

VŠB – Technická univerzita Ostrava

Fakulta Strojní

Katedra energetiky

Návrh malé vodní elektrárny  
Proposal of Small Hydropower Plant

Autor práce:

Filip Zajac

Vedoucí práce:

doc. Ing. Mojmír Vrtek, Ph.D.

Ostrava 2017

VŠB - Technická univerzita Ostrava  
Fakulta strojní  
Katedra energetiky

## Zadání bakalářské práce

Student: **Filip Zajac**  
Studijní program: B2341 Strojírenství  
Studijní obor: 3907R009 Provoz energetických zařízení  
Téma: **Návrh malé vodní elektrárny**  
**Proposal of Small Hydropower Plant**  
Jazyk vypracování: čeština

Zásady pro vypracování:

Zpracujte návrh malé vodní elektrárny pro vybranou lokalitu.

Práce bude obsahovat:

1. Rešerši na téma využití energie malých vodních toků.
2. Popis a analýza hydropotenciálu vybrané lokality.
3. Návrh výkonových parametrů a skladby turbín v malé vodní elektrárně.
4. Energetické, ekonomické a environmentální zhodnocení.

Seznam doporučené odborné literatury:


KAMINSKÝ, J., VRTEK, M. *Obnovitelné zdroje energie*. Ostrava: VŠB – TU Ostrava, 1998. 102 s. ISBN 80-7078-445-8.  
KMINIAK, P. *Vodné mikroelektrárne*. 1. vyd. Bratislava: ALFA, 1990. ISBN 80-05-00771-X.  
GABRIEL, P., ČIHÁK, F., KALANDRA, P. *Malé vodní elektrárny*. Praha : ČVUT, 1998. ISBN 80-01-01812-1.  
GULLIVER, J., S., ARNDT, R., E., A. *Hydropower engineering handbook*. 1. vyd. New York: McGraw-Hill, 1991. ISBN 0-07-025193-2.

Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.


Vedoucí bakalářské práce: **doc. Ing. Mojmír Vrtek, Ph.D.**

Datum zadání: 09.12.2016

Datum odevzdání: 15.05.2017

  
doc. Ing. Kamil Kolarčík, CSc.  
vedoucí katedry



  
doc. Ing. Ivo Hlavatý, Ph.D.  
děkan fakulty

Místopřísežné prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou bakalářskou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové bakalářské práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě .....15.5 2017.....

.....Lajac.....

podpis studenta

Prohlašuji, že

- jsem byl seznámen s tím, že na moji bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména § 35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a § 60 – školní dílo.
- беру на vědomі, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen „VŠB-TUO“) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě bakalářskou práci užít (§ 35 odst. 3).
- souhlasím s tím, že diplomová (bakalářská) práce bude v elektronické podobě uložena v Ústřední knihovně VŠB-TUO k nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího bakalářské práce. Souhlasím s tím, že údaje o kvalifikační práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.
- bylo sjednáno, že s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona.
- bylo sjednáno, že užít své dílo – bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- беру на vědomі, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě : 15.5.2017 .....

.....  
Zajac

podpis

Jméno a příjmení autora práce:

Filip Zajac

Adresa trvalého pobytu autora práce:

Bílá 26 okr. Frýdek-Místek

739 15 Bílá 26

## ANOTACE BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

ZAJAC F. Návrh malé vodní elektrárny. Bakalářská práce. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra energetiky, 2017. (?) s. Vedoucí práce: Vrtek, M.

Bakalářská práce se zabývá řešením na téma využití energie malých vodních toků. V první polovině se zaměřuji především na popis malých vodních elektráren. Rozdělení vodních turbín a zpracování hydro-potenciálu České Republiky. V praktické části navrhuji výkonové parametry a skladbu turbín pro lokalitu řeky Olše v kraji Moravskoslezském. Na základě průtokové křivky a spádu je navržena malá vodní elektrárna. V závěru práce se věnuji ekonomickému, environmentálnímu a energetickému zhodnocení projektu.

## ANNOTATION OF BACHELOR THESIS

ZAJAC F. Proposal of Small Hydropower Plant. Bachelor Thesis. Ostrava: VŠB - Technical University of Ostrava, Faculty of Mechanical Engineering, Department of Power Engineering, 2017. (?) s. Vedoucí práce: Vrtek, M.

The bachelor thesis deals with research on the use of energy of small water flows. The first half focuses mainly on the description of small hydro power plants. The division of water turbines and hydropotency of the Czech Republic. In the practical part I propose the performance parameters and the composition of turbines for the site of the river Olše in the region of Moravia-Silesia. On the basis of the flow curves and the gradient is designed a small hydroelectric power plant. At the conclusion of the work I devoted to the economic, environmental and energy assessment of the project.

# OBSAH

1.Úvod .....	1
2.Vodní energie .....	2
3.Využití vodní energie v ČR.....	2
4.Význam vodních elektráren pro energetiku ČR .....	3
4.1 Princip vodní elektrárny .....	4
5.Rozdělení vodních elektráren .....	4
6.Hydroenergetický potenciál vodního toku.....	7
7.Základní parametry hydroenergetického díla.....	8
7.1 Spád.....	8
7.2 Průtok.....	9
8.Základní parametry vodního toku.....	9
9.Teorie Turbíny .....	11
9.1 Otáčky turbíny.....	11
9.2 Specifické otáčky .....	11
9.3 Průběžné otáčky.....	12
9.4 Účinnost turbíny.....	12
9.5 Hydraulická účinnost.....	12
9.6 Objemová účinnost .....	12
9.7 Mechanická účinnost .....	13
9.8 Celková účinnost turbíny.....	13
9.9 Mechanický výkon turbíny .....	13
9.10 Hydraulický výkon turbíny.....	14
9.11 Jmenovitý výkon turbíny .....	14
9.12 Instalovaný výkon.....	14
10.Typy vodních turbín .....	14
10.1 Přetlakové turbíny.....	14
10.1.1 Francisova turbína.....	15

10.1.2	Kaplanova turbína .....	15
10.2	Rovnotlaké turbíny.....	16
10.2.1	Bánkiho turbína.....	17
10.2.2	Peltonova turbína.....	17
11.	Základní elektrické zařízení vodních elektráren.....	19
11.1	Elektrické generátory .....	19
11.1.1	Synchronní generátor.....	20
11.1.2	Fázování synchronního generátoru.....	20
11.1.3	Asynchronní generátor.....	21
11.1.4	Fázování asynchronního generátoru.....	21
12.	Výběr lokality .....	21
12.1	Hydrologické údaje lokality.....	21
13.	Návrh strojní části MVE.....	22
13.1	Hydroenergetické řešení MVE .....	22
14.	Turbína .....	24
14.1	Výpočet parametrů turbíny.....	25
14.2	Vlastní konstrukce turbíny .....	28
14.3	Princip dvoukomorové průtokové vodní turbíny.....	29
14.4	Regulace Bánkiho turbíny .....	30
14.5	Stanovení množství vyrobené elektrické energie .....	31
15.	Odhad investičních nákladů .....	32
16.	Ekologie.....	38
17.	Emise.....	38
18.	Závěr.....	40
18.	seznam zdrojů .....	41
19.	Seznam obrázků .....	43
20.	seznam tabulek .....	44

## 1. ÚVOD

V České republice máme dostatečné množství elektráren využívající k výrobě elektrické energie buď fosilní paliva, nebo štěpné reakce uranu, plutonia. Problém nastává v tom, že tyto paliva jsou vyčerpatelná, a při jejich využívání vznikají nebezpečné látky a to zvláště u elektráren jaderných. Tento odpad se musí kvůli radioaktivitě ukládat na bezpečných místech. Proto je ve světě snaha maximálně zvýšit využívání obnovitelných zdrojů energie. Ze všech obnovitelných zdrojů energie (energie větru, sluneční energie, geotermální energie) má energie vody neboli hydroenergetický potenciál nejvyšší podíl a zároveň i nejlepší podmínky. Přeměnou hydroenergetického potenciálu na elektrickou energii nevznikají žádné odpady ani zplodiny a neznečišťuje se životní prostředí. Na víc hydroenergetický potenciál je neustále se obnovující a proto nevyčerpatelný. Na víc je v České republice dostupný a nejsme závislí na zahraničí. Proto ani změny v mezinárodní situaci neovlivní jeho využívání.

Technologické zařízení vodních elektráren má vynikající pružné vlastnosti v provozu - je jednoduché vodní elektrárny spustit do provozu a jednoduché je i odstavit je bez jakéhokoli vlivu na životní prostředí. Vodní elektrárny se proto používají jako špičkový zdroj na pokrytí převážné části proměnlivých zatížení v naší elektrizační soustavě.

Provoz vodních elektráren je pro naši soustavu těžko nahraditelný, a proto je racionálně hlavně z hlediska šetření našeho životního prostředí, jejich co největší uplatnění a rozvoj.

V řešební části bakalářské práce jsem se věnoval využití vodní energie v České republice a zpracování využití hydroenergetického potenciálu. Rozdělení vodních elektráren a jednotlivých vodních turbín. V praktické části jsem zpracoval hydroenergetický potenciál konkrétní lokality a následně jsem navrhnul výkonové parametry a skladbu malé vodní elektrárny. Na konci práce jsem celý projekt ekonomicky zhodnotil a vypočítal dobu návratnosti.



## 2. VODNÍ ENERGIE

Tato kapitola je zpracována z [15]

V Historii lidstva je vodní energie nejdéle využívaným energetickým zdrojem a je jedním z obnovitelných zdrojů energie. Energie proudící vody byla v minulosti využívána již dávno. Sloužila k pohonu mlýnů, pil, či hamrů, později také pro výrobu elektřiny v malých elektrárnách. Ve středověku bylo typické vodní kolo, kde se voda přiváděla shora a při pohybu dolů dopadala na lopatky vodního kola s vodorovnou osou a roztáčela jej. V mlýnech se vodní energie využívala hlavně k mletí obilí a drcení zemědělských plodin.

V 19. a 20. století nastal rozvoj vodních elektráren. Důvodem bylo několik okolností. Jednou z nich byla možnost výroby a přenosu elektrické energie a rostoucí ceny uhlí. Další z okolností bylo to, že v této době začínaly být k dispozici účinnější vodní turbíny. Vodní elektrárny postupně pomáhaly k elektrifikaci obcí. Výkony elektráren se před válkou pohybovaly od 10 do 100kW.

V roce 1882 byla postavena jedna z prvních vodních elektráren, která se nacházela pod Niagarskými vodopády.

Poháněcím motorem vodní elektrárny je energie ze Slunce, která zajišťuje nepřetržitý koloběh obrovského množství vody. Voda nad elektrárnou má určitou potenciální energii, kterou ztrácí při průtoku turbínou a přitom koná práci – otáčí turbínou, která vyrábí elektrický proud.

### **Znaky vodní energie**

- Nevyčerpatelný a kolísavý přítok
- Přirozená koncentrace nositele z povodí do hlavních toků
- Značné investiční náklady pro budování vodních děl
- Nízké provozní náklady vodních elektráren

## 3. VYUŽITÍ VODNÍ ENERGIE V ČR

Tato kapitola je zpracována z [5,7]

Voda je nositelem chemické, tepelné a mechanické energie. Do mechanické energie můžeme zahrnout energii vodních srážek, ledovců, moří a vodních toků. Nejvýznamnější energii z hlediska technického využití je energie vodních toků, kde se využívá její potenciální a okrajově i kinetická forma energie. V současnosti ve vodních elektrárnách lze energii vodních toků využívat již zvládnutým strojně-technologickým

zařazením poměrně vysoké technicko-ekonomické úrovně. Z hlediska biologického i z hlediska funkčního je voda pro člověka velmi důležitý zdroj energie. Používá se v různých technologiích a je potřebná převážně v zemědělství.

V České republice má využívání vodní energie dlouholetou tradici. 23. června 1887 bylo velkým úspěchem Františka Křižíka propagační osvětlení centra města Písku (První město v Čechách s veřejným elektrickým osvětlením), kdy v jeho návaznosti v roce 1888 bylo vybudováno nejstarší zařízení na přeměnu mechanické energie vody na elektrickou energii. Další vodní elektrárny, které v ČR existovaly, byly na počátku 20. století v Těšnově a na Štvanici. V roce 1929 byla vodní elektrárna v Těšnově zrušena, Štvanická je po rekonstrukci provozována dodnes.

V Česku nejsou pro budování velkých vodních energetických děl přírodní poměry zcela ideální. Na našem území nemají nutný spád ani dostačující množství vody. Lokality kde by mohly elektrárny stát se už vyčerpaly. Z toho důvodu je procento výroby elektrické energie ve vodních elektrárnách v České republice relativně malé. Vodní elektrárny hrají v rámci obnovitelných zdrojů velkou roli. Slouží jako doplňkový zdroj výroby elektrické energie a především využívá své schopnosti rychlého najetí na velký výkon a tedy operativního vyrovnaní okamžité energetické bilance v elektrizační soustavě ČR.

Dnes máme přibližně 1 400 vodních elektráren s 2 176 MW instalovaného výkonu, které v naší zemi vyrábí ročně 2,11 TWh elektřiny (v přepočtu na průměrný vodný rok). Malé elektrárny, mezi které počítáme zdroje o 10 MW instalovaného výkonu, vyrobí každý rok 0,92 TWh. Hydroenergetický potenciál, nevyužitý u nás v MVE je spočten na 0,42 TWh. Což je dalších přibližně 400 nových provozů, ale i rekonstrukce stávajících elektráren. Vzhledem k dostupnosti dobrého technologického zabezpečení od množství českých výrobců, je možné využívat i lokality s nízkými spády. Kromě instalovaného výkonu se vodní elektrárny rozdělují z hlediska různých kritérií.

#### 4. VÝZNAM VODNÍCH ELEKTRÁREN PRO ENERGETIKU ČR

Tato kapitola je zpracována z [2,3,5]

V hydrologických podmínkách České republiky význam vodních elektráren spočívá ve specifických vlastnostech jejich provozu, a ne v objemu vyrábění elektrické energie. Vodní elektrárny představují levný zdroj elektrické energie, který se používá především v období špičkové spotřeby, a zvládnou velmi hbitě reagovat na okamžitou spotřebu elektrické energie v elektrické soustavě. Přecherpací vodní elektrárny umožňují i účelné využití elektřiny produkovat méně flexibilními energetickými zdroji v období nízké spotřeby. Vodní elektrárny mají také vodohospodářský význam.

Mezi nejvýznamnější typy vodních elektráren, s výjimkou vodních elektráren průtokových patří elektrárny akumulární, které jsou součástí vodní děl – nádrží. Tyto

vodní díla kromě akumulace vody pro vyrábění elektrické energie stabilizují průtoky říčním korytem, podporují ekonomicky příznivé plavební možnosti vodních toků a chrání před povodňovými vlnami.

Břehy nádrží mohou sloužit jako rekreační oblasti. Nádrže jsou mnohdy také zdrojem pitné vody pro vodárny, závlahové vody pro průmysl a také jsou zdrojem technologické vody pro průmysl. Využívání vodních elektráren a zejména vodních děl z hlediska vodohospodářského významu se projevilo v období katastrofických záplat v roce 2002. Těm se sice v povodí Vltavy nepovedlo zcela zamezit; jejich důsledky by však bez schopnosti pohotově a plánovitě přivál vodní masy zastavit byly daleko ničivější.

Vodní elektrárny mají řadu specifických vlastností. Jednou z vlastností je schopnost přečerpávacích vodních elektráren pohotově řešit zvýšenou potřebu elektrické energie v době energetických špiček.

Elektrizační soustava země musí v každém okamžiku vyprodukovat přesně tolik energie, kolik jí je právě potřeba. Spotřeba elektrické energie se během dne, tak i v delších obdobích neustále mění.

#### 4.1 Princip vodní elektrárny

Ve vodních elektrárnách roztáčí turbínu voda vtékající přívodním kanálem. Turbína se nachází na společné hřídeli s generátorem elektrické energie a spolu tvoří tzv. turbogenerátor. Na bázi elektromagnetické indukce se tak mechanická energie proudící vody mění na elektrickou energii. Ta se přemění a odvede do míst spotřeby.

Vodní turbíny jsou technicky nejdokonalejší mechanické motory, které dosahují až 95% účinnosti. Výběr turbíny závisí na podmínkách a účelu celého vodního díla. Nejčastěji se osazují turbíny Kaplanova nebo Francisova, tedy turbíny reakčního typu, a to v bohaté řadě modifikací. V podmínkách našich toků se nejčastěji používají Kaplanovy turbíny s nastavitelnými lopatkami. Kaplanova turbína několikanásobně dosahuje vyšší rychlosti, než je rychlost proudění vody a je tedy vhodná pro menší spády a velké množství vody. Naopak pro vysoké spády (až 500m) se používá turbína Peltonova. Peltonova turbína je rovnotlaký stroj, jehož obvodová rychlost otáčení je nižší než rychlost proudění. V malých vodních elektrárnách se převážně používá horizontální Bánkiho turbína spolu s upravenou jednoduchou Francisovou turbínou. Pro velké spády vykazuje největší účinnost Dériazova turbína z roku 1951. Jde o diagonální verzi Kaplanovy turbíny.

Položení vlastní elektrárny může být různé. Závisí však na výškových a spadových možnostech, na množství vody a na tvaru terénu.

## 4.2 Rozdělení vodních elektráren

Vodní elektrárny můžeme třídit dle různých hledisek.

**Podle velikosti instalovaného výkonu:**

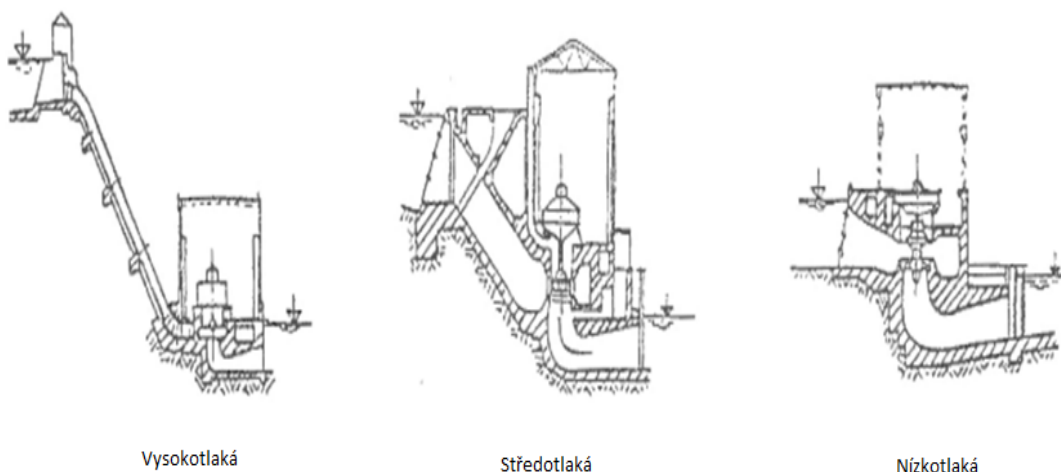
- Malé – s instalovaným výkonem do 10 MW
- Střední – s instalovaným výkonem do 10 MW do 200 MW
- Velké – s instalovaným výkonem nad 200 MW

**Rozdělení MVE z výkonového hlediska není jednoznačné, a proto se podle ČSN 75 0128 dělí na:**

- Průmyslové – s instalovaným výkonem od 1 MW do 10 MW
- Minielektrárny – s instalovaným výkonem od 100 kW do 1000 kW
- Mikroelektrárny – s instalovaným výkonem od 35 kW do 100 kW
- Domácí – s instalovaným výkonem do 35 kW

**Podle velikosti využívaného spádu:**

- Nízkotlaké – využívají spád do 20 m
- Středotlaké – využívají spád 20–100 m
- Vysokotlaké – využívají spád nad 100 m



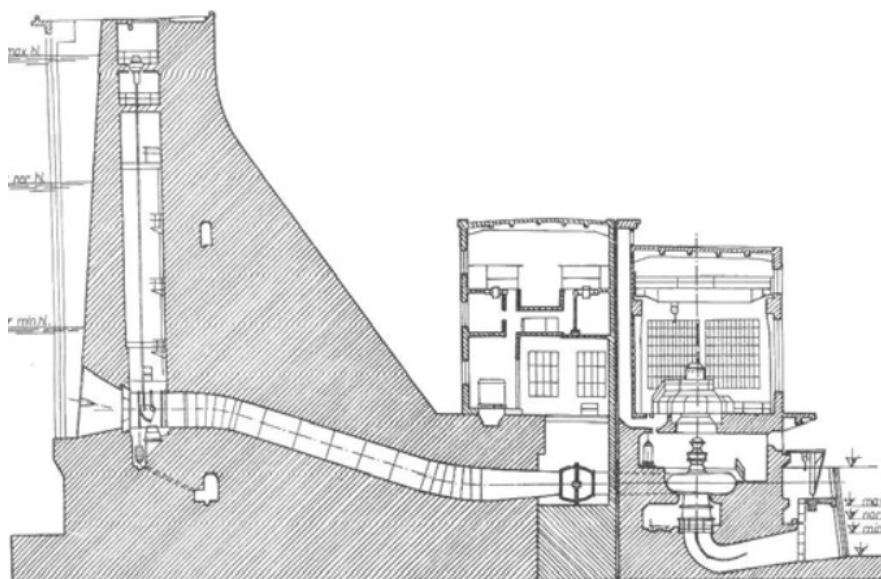
Obrázek 1 - Rozdělení vodních elektráren podle využití velikosti spádu [8]

## Podle charakteru pracovního režimu

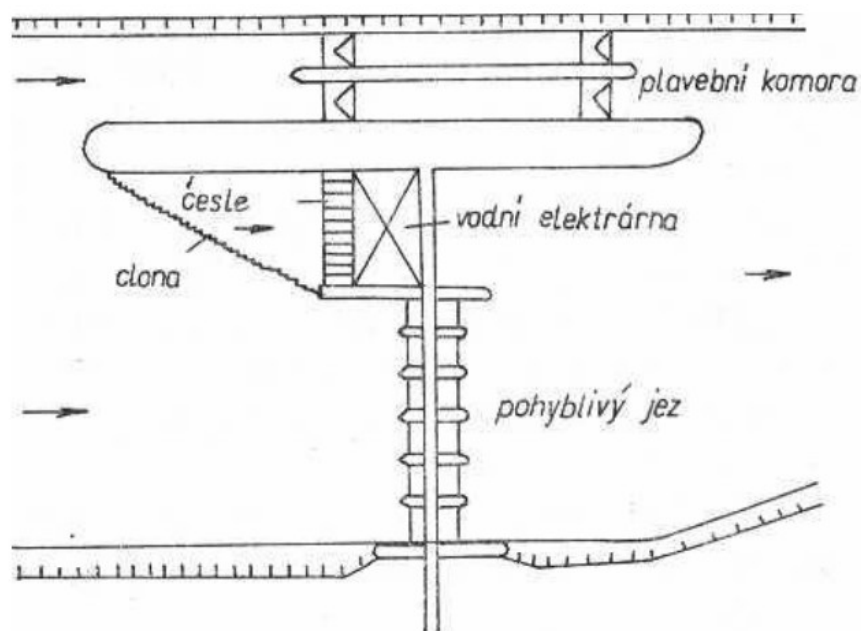
- Akumulační – Udržují a regulují vodní tok. Pracují jen několik hodin denně, a to především v případech nedostatku elektrické energie v přenosové soustavě. Tyto elektrárny jsou charakteristické středním až vysokým spádem
- Průtočné – Neovlivňují výrazně přirozený průtok toku a nemají akumulační nádrž. Jedná se o elektrárny s malým spádem, ale stálým průtokem, tzn., že je v provozu po celý den
- Přecherčávací – Mají schopnost uskladnění elektrické energie v době jejího přebytku v přenosové soustavě. Tyto energie mají minimálně dvě nádrže. V době přebytku el. Energie pracuje elektrárna v čerpadlovém režimu, ve kterém čerpá vodu z dolní nádrže do horní nádrže a tím spotřebovává elektřinu. Tyto elektrárny jsou vybaveny turbínami i čerpadly, nebo speciální čerpadlovou turbínou.

## Podle získaného spádu:

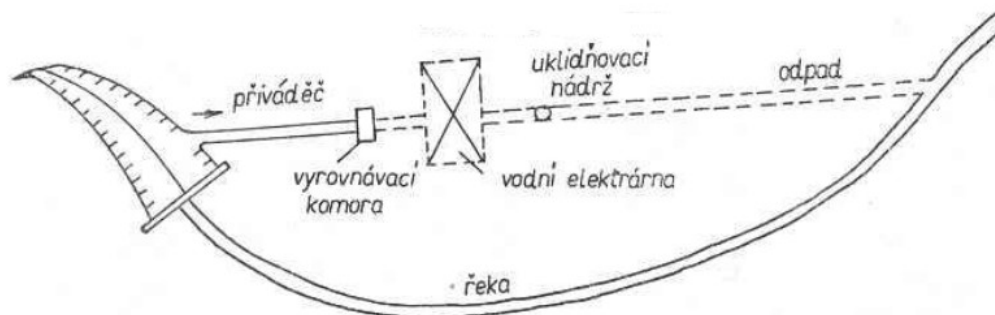
- Přehradové – spád vytvořen přehradou
- Zdržové (jezové) -Spád vytvořen jezem
- Derivační – Využívá umělé vedení vody mimo vodní tok pomocí beztlakového nebo tlakového derivačního přivaděče.
- Přehradně derivační – kombinace výše uvedených dvou



Obrázek 2 - Přehradová vodní elektrárna[9]



Obrázek 3 - Jezová vodní elektrárna[9]



Obrázek 4 - Derivační vodní elektrárna[9]

## 5. HYDROENERGETICKÝ POTENCIÁL VODNÍHO TOKU

Tato kapitola je zpracována z [14,2,5]

Protéká-li každou sekundu množství  $Q$  kapaliny o měrné hmotnosti  $\rho$  výškový rozdíl  $H$  ve směru zemské tíže, koná každou sekundu práci, čili odevzdá výkon  $P$ :

$$P = Q \cdot \rho \cdot g \cdot H \text{ [kW]} \quad (5.1)$$

Kde:  $P$ ...výkon

$\rho$ ...měrná hmotnost

$g$ ...gravitační zrychlení

$H$ ...výškový rozdíl

V každé řece nebo potůčku se skrývá určité množství vodní energie. Hydroenergetickým potenciálem označujeme velikost energie, kterou představuje jeho roční průtok. Každý potenciál vztažený na jednotlivé území nebo oblast slouží k přehledu o možnosti využití potenciální energie jednotlivých toků v dané oblasti. Tento hydroenergetický potenciál můžeme rozdělit na hrubý, teoretický a reálný.

- Hrubý hydroenergetický potenciál - Je určen z nadmořských výšek a příslušných průměrných průtoků pro danou oblast a je vztažen k hladině ústí do moře anebo ke kótě hladiny na státní hranici.
- Teoretický hydroenergetický potenciál - Pro Českou republiku je vyhodnocen Teoretický hydroenergetický potenciál ve Směrných vodohospodářských plánech. Při stoprocentním využití spádu toku a jeho středního průtoku představuje teoretickou zásobu energie v tocích.
- Reálně využitelný hydroenergetický potenciál - Je menší než teoretický. Nikdy nedokážeme využít celý spád na sto procent, a to kvůli komunikacím, chráněným krajinným oblastem a dalšími objekty nacházejícími se v toku řeky. Dalším problémem je nemaximální přeměna vodní energie na elektrickou, a to z důvodu ztráty na spádu průtoku, odparu a ztráty při převodu energie. Dosahujeme asi 40-50 % teoretického potenciálu.

## 6. ZÁKLADNÍ PARAMETRY HYDROENERGETICKÉHO DÍLA

Tato kapitola je zpracována z [2,5,14]

Mezi základní parametry, které charakterizují hydroenergetické dílo patří:

Spád- $H$

Průtok- $Q$

Účinnost- $\eta$

Výkon- $P$

Výroba elektrické energie- $E$

### 6.1 Spád

Spád  $H$  je výškový rozdíl vody v nádrži nad nebo pod vodní elektrárnou, který se udává v metrech. Při určování spádu je potřebné uvědomit si rozdíl mezi hrubým statickým a čistým dynamickým spádem. Hrubý spád je vertikální vzdálenost mezi vrcholem potrubí, nebo kanálu odvádějící vodu z toku a bodu, ve kterém se voda z turbíny

vypouští. Čistý spád je rozdíl hrubého spádu zmenšený o ztráty v důsledku turbulence a tření v potrubí.

Celkový spád vodní elektrárny  $H_c$  je statický spád mezi dvěma posuzovanými úseky, který chceme využít pro vodní elektrárny. Lze ho snadno určit, jelikož je daný výškovým rozdílem horní a dolní hladiny při nulovém průtoku vodní elektrárnou.

Čistý spád vyjadřujeme jako spád zmenšený o hydraulické ztráty kromě ztráty v hydraulickém obvodu. Pokud odečteme, hydraulické ztráty v hydraulickém obvodu získáme užitečný spád vodní elektrárny. Užitečný spád je celkový spád, od něhož jsou odečteny všechny ztráty v přiváděči a odpadu, které nezahrnujeme do účinnosti turbíny. Pro turbíny můžeme uvést tyto užitečné spády: Návrhový spád, maximální spád a spád jmenovitý.

Spád je určen topografickými a hydraulickými poměry, schémata a typem hydroenergetického díla, stavebním a hydraulickým řešením objektu.

## 6.2 Průtok

Průtok turbínou je celková spotřeba vody turbínou, do které zahrnujeme ztráty vody prosáknuté těsněním a vody, která přetéká obtokovými trubkami. Jednotkou je  $\text{m}^3/\text{s}^{-1}$ . Základním údajem turbíny je objemový průtok, který je určen objemem vody, která přeteče určitým průřezem za jednotku času. Určujícím je jmenovitý průtok  $Q_n$ , to je průtok turbínou při jmenovitých otáčkách a při jmenovité měrné energii.

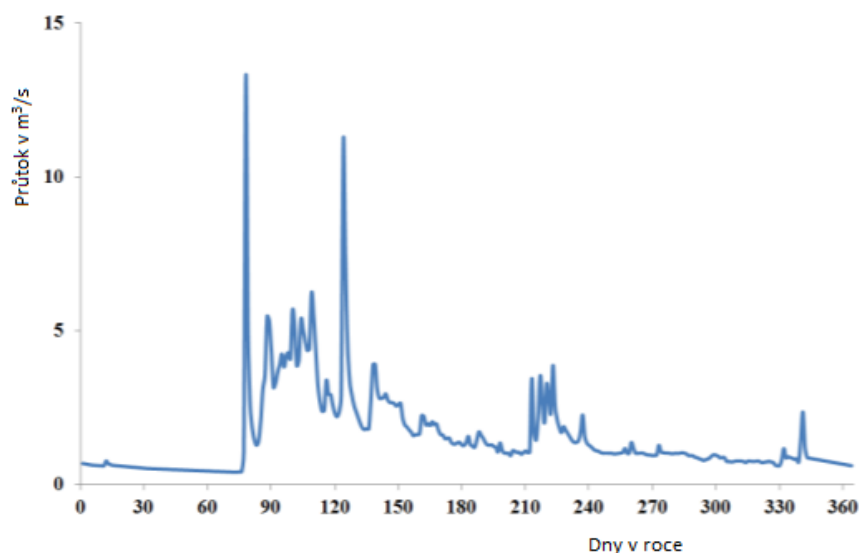
Z hlediska průtoku vody vodním strojem rozeznáváme: Průtok turbínou  $Q_T$ , hltnost turbíny  $Q_H$ , jmenovitou hltnost  $Q_{jm}$ , návrhový průtok turbínou  $Q_n$ , využitelný průtok turbínou  $Q_v$ , jednotkový průtok turbínou  $Q_1$ , průtok turbínou při chodu na prázdno  $Q_0$  a průtokovou kapacitu.

Informace získané na základě dlouhodobých vodočetných měření na vodních tocích nám poskytuje hydrometeorologický ústav. U menších toků je možnost provést odhad z izochar průměrných specifických odtoků, nebo metodami uvedenými v odborné literatuře.

## 7. ZÁKLADNÍ PARAMETRY VODNÍHO TOKU

**Chronologická čára denních průtoků** – je sestavena z hodnot naměřených v limnigrafických stanicích, kde se daný průtok měří podle výšky hladiny a známého tvaru průtokového průřezu koryta vodního toku.

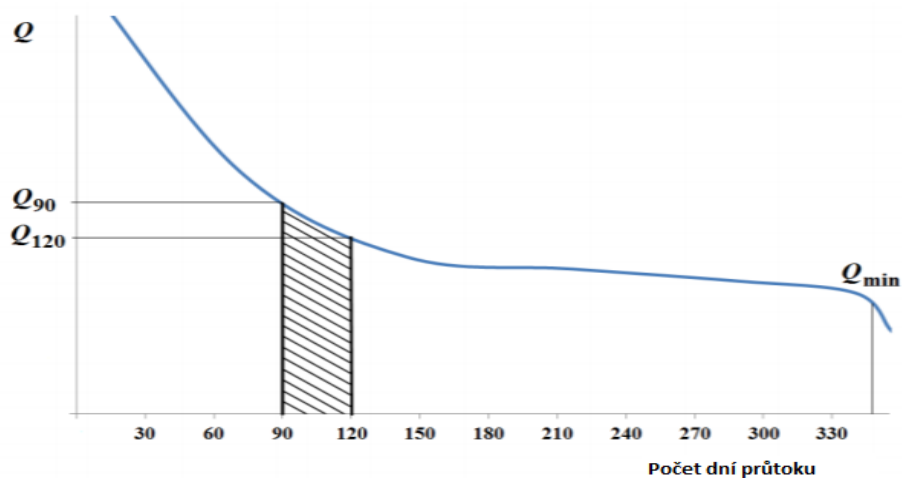




Obrázek 5 - Chronologická čára vodních průtoků

**Odtoková křivka vodního toku** – je hlavním údajem pro návrh vodních elektráren. Je grafickým znázorněním průtoků určitého trvání, tedy průtoků, které se dosáhly anebo které byly překročeny za určitý časový interval v roce anebo dnech či případně v měsících. Při sestavení odtokových křivek bereme v úvahu průměrné hodnoty chronologických průtoků za delší časový úsek, a to proto, abychom vyloučili působení suchých a mokrých roků. Poté se určí vyznačené hodnoty průtoků. Které při návrhu MVE slouží na zhodnocení výkonů vodních toků.

V MVE v našich podmínkách se dimenzuje průtok turbínami na průtoky v rozmezí  $Q_{90} \div Q_{120}$ , z toho vyplývá, že průměrnému hydrologickému roku je instalovaný výkon využitý celý a případný nadbytečný průtok propadáva nevyužitý přes jez 90 až 120 dnů a 245 až 275 dnů v roce je instalovaný výkon nevyužitý. Výhodným sestavením je použití vícero druhů turbín, avšak toto řešení se využívá především ve velkých vodních elektrárnách.



Obrázek 6 - Odtoková křivka vodního toku

**Energie vodního toku** – vyplývá z Bernuliho rovnice, z potencionální a kinetické energie vodního proudu a rozdílu výšek.

$$\frac{P_1}{\rho g} + \frac{c_1^2}{2g} + h_1 = \frac{P_2}{\rho g} + \frac{c_2^2}{2g} + h_2 \quad (7.1)$$

Kde P...tlak

c...rychlost proudění

g...gravitační zrychlení

ρ...hustota

h...výška

## 8. TEORIE TURBÍNY

Tato kapitola je zpracována z [3,6,13]

### 8.1 Otáčky turbíny

Otáčky turbíny jsou závislé na průměru oběžného kola. Zmenšováním průměru oběžného kola při stálém spádu se zvyšují jeho otáčky, což je vhodné při malých spádech. Turbína s menším průměrem oběžného kola je levnější, avšak průtokové rychlosti vody v ní jsou vyšší. Zároveň se s nimi zvětšují i ztráty a snižuje se účinnost turbíny. Z tohoto důvodu se při návrhu turbíny může zmenšovat průměr oběžného kola, tedy zvětšovat otáčky, jen pro určité hodnoty, při kterých je účinnost ještě příznivá. Volba provozních otáček však závisí i na konkrétním řešení spojení turbíny s generátorem.

### 8.2 Specifické otáčky

Charakterizují schopnost stroje dosáhnout při maximálních možných otáčkách největší výkon. Dostaneme je, jak přepočítáme rozměr turbíny tak, aby při spádu  $H=1\text{m}$  měla turbína výkon 0,736kW. Pro výpočet specifických otáček turbíny platí vztah:

$$n_s = \frac{n}{H} \frac{\sqrt{1,36P}}{\sqrt[4]{H}} \quad (8.1)$$

Kde n...otáčky

H...spád

P...výkon

### 8.3 Průběžné otáčky

Jsou nejvyšší otáčky, které může turbína dosáhnout. Určují se podle diagramu. Turbína jich dosáhne při úplném odlehčení a plném průtoku vody. Tedy tehdy, když turbína dosahuje při 100 % výkonu při zatížení. Do průběžných otáček se turbína dostává jen výjimečně při poruše činnosti generátoru a regulace. Častěji se však přechodně zvýší otáčky při odstavení a odlehčení generátoru.

### 8.4 Účinnost turbíny

Účinnost turbíny je definována poměrem mechanického výkonu a hydraulického příkonu turbíny:

$$\eta = \frac{P}{P_h} \quad (8.2)$$

Kde  $P$ ...mechanický výkon

$P_h$ ...hydraulický příkon turbíny

Tento výpočet zahrnuje všechny ztráty, které vznikají v turbíně a představují tedy celkovou účinnost.

### 8.5 Hydraulická účinnost

Je určena hydraulickými ztrátami, které vznikají následkem viskózního tření částic uvnitř toku vody a na obtékaných plochách. Tyto ztráty vznikají kvůli obtékání profilu lopatek, rázu na vstupu do lopatkové mříže, tvořením virů a jejich odtrháváním.

$$\eta_h = 1 - \frac{E_d}{E} \quad (8.2)$$

Kde  $E_d$ ...hydraulické ztráty

$E$ ...energie kapaliny

### 8.6 Objemová účinnost

Je dána objemovými ztrátami  $\Delta Q$  vznikajícími v těsnění, odlehčovacích zařízeních a mezerách mezi lopatkami a komorou. Její určování je opodstatněno pouze při přetlakových turbínách, jelikož část těchto ztrát je možno energeticky využít, v případě rovnotlakých turbín to není možné. Vypočítá se takto:

$$\eta_q = 1 - \frac{\Delta Q}{Q} \quad (8.3)$$

Kde  $\Delta Q$ ...objemové ztráty

$Q$ ...průtok

## 8.7 Mechanická účinnost

Je dána mechanickými ztrátami v radiálním a axiálním ložisku a diskovými ztrátami rotací povrchu konce náboje oběžného kola ve vodě:

$$\eta_m = 1 - \frac{P_d}{P} \quad (8.4)$$

Kde  $P_d$ ...diskové ztráty

$P$ ...mechanické ztráty v ložisku

## 8.8 Celková účinnost turbíny

Je dána součinem účinnosti hydraulické, objemové a mechanické. V provozu nastává vplyvem změn parametrů, změnou hydraulické účinnosti, a díky tomu se změní i celková účinnost.

$$\eta = \eta_q \cdot \eta_h \cdot \eta_m \quad (8.5)$$

Kde  $\eta_q$ ...objemová účinnost

$\eta_h$ ...hydraulická účinnost

$\eta_m$ ...mechanická účinnost

## 8.9 Mechanický výkon turbíny

Je dán hodnotou mechanické energie dodávané hřídelem turbíny za určitý čas. Určuje se výkonem generátoru měřeným na svorkách, který je nižší o mechanické a elektrické straty generátoru, ztráty v přívodech a setrvačníku.

$$P = \rho \cdot Q_v \cdot E \cdot \eta \quad (8.6)$$

Kde  $\rho$ ...hustota

$\eta$ ...účinnost turbíny

$Q_v$ ...průtok turbínou

E...energie kapaliny

## 8.10 Hydraulický výkon turbíny

Je teoretický výkon odpovídající průtoku vstupním průřezem turbíny:

$$P_h = \rho \cdot Q_v \cdot E \quad (8.7)$$

Kde  $\rho$ ...hustota

$Q_v$ ...průtok turbíny

E...energie kapaliny

## 8.11 Jmenovitý výkon turbíny

Je výkon turbíny při jmenovité měrné energii a jmenovitých otáčkách. Další se rozlišuje zaručovaný výkon, což je mechanický výkon turbíny při zaručené měrné energii a zaručených otáčkách.

## 8.12 Instalovaný výkon

Je maximální výkon turbíny, který je možné dosáhnout při nejpříznivějších podmínkách.

# 9. TYPY VODNÍCH TURBÍN

Tato kapitola je zpracována z [2,3,6,13]

Podle způsobu využití se turbíny dělí na:

Rovnotlaké (Peltonova, Bánkiho)

Přetlakové (Francisova, Kaplanova)

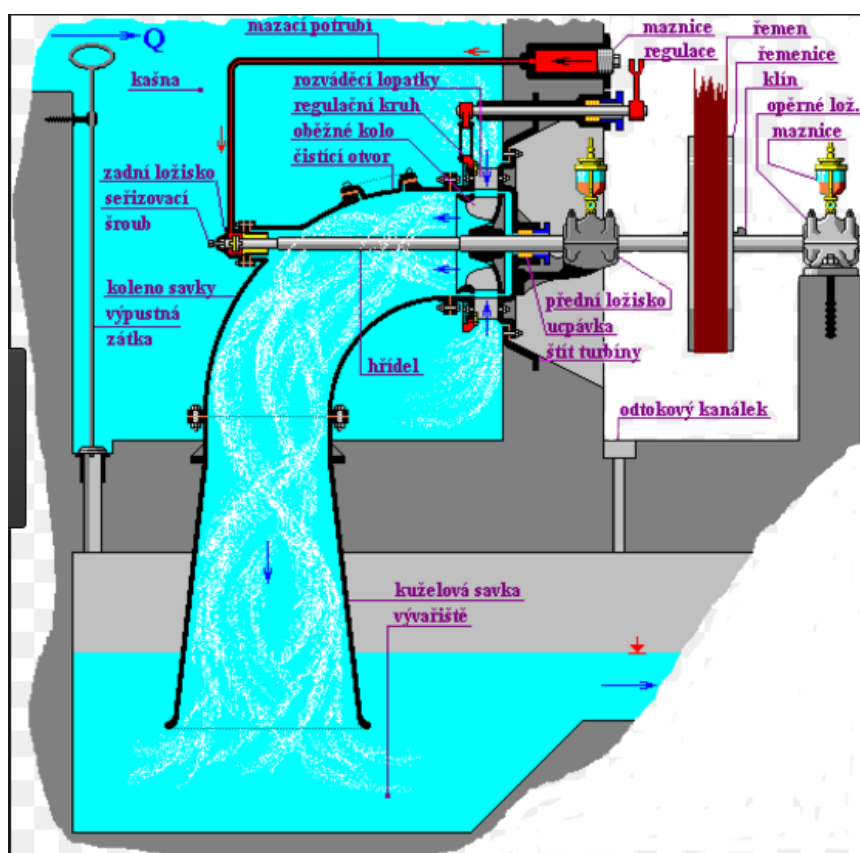
## 9.1 Přetlakové turbíny

Toto označení vyplývá z působení vody na vstupu do turbíny takzvaným přetlakem. V turbíně se mění část tlakové měrné energie v příváděcím zařízení k oběžnému kolu turbíny na kinetickou měrnou energii. Zbývající část tlakové měrné energie se přemění na kinetickou energii přechodem vody přes oběžné kolo turbíny. Charakteristickým rysem přetlakových turbín je změna průtoku při zvyšujících se otáčkách.

### 9.1.1 Francisova turbína

Francisova turbína je nejpoužívanější typ vodní turbíny. Je určena pro spády zhruba do 500m. Spodní hranice využití těchto turbín se pohybuje okolo 100m. Jedná se o přetlakovou turbínu vyvinutou v roce 1848 Jamesem B.Francisem. Možnost uložení hřídelí je buď vertikální, nebo horizontální.

Voda je na oběžné kolo přiváděna pomocí spirály, u menších spádů i odkrytou kašnou. Na oběžné kolo Francisovy turbíny je voda přiváděna rozváděcím kolem radiálním směrem, přičemž v oběžném kole se mění na směr axiální. Rozváděcí kolo je obvykle konstruováno z lopatek, které jsou otočené kolem čepů, a reguluje se jimi průtok turbínou.



*Obrázek 7 - Schéma Francisovy turbíny[10]*

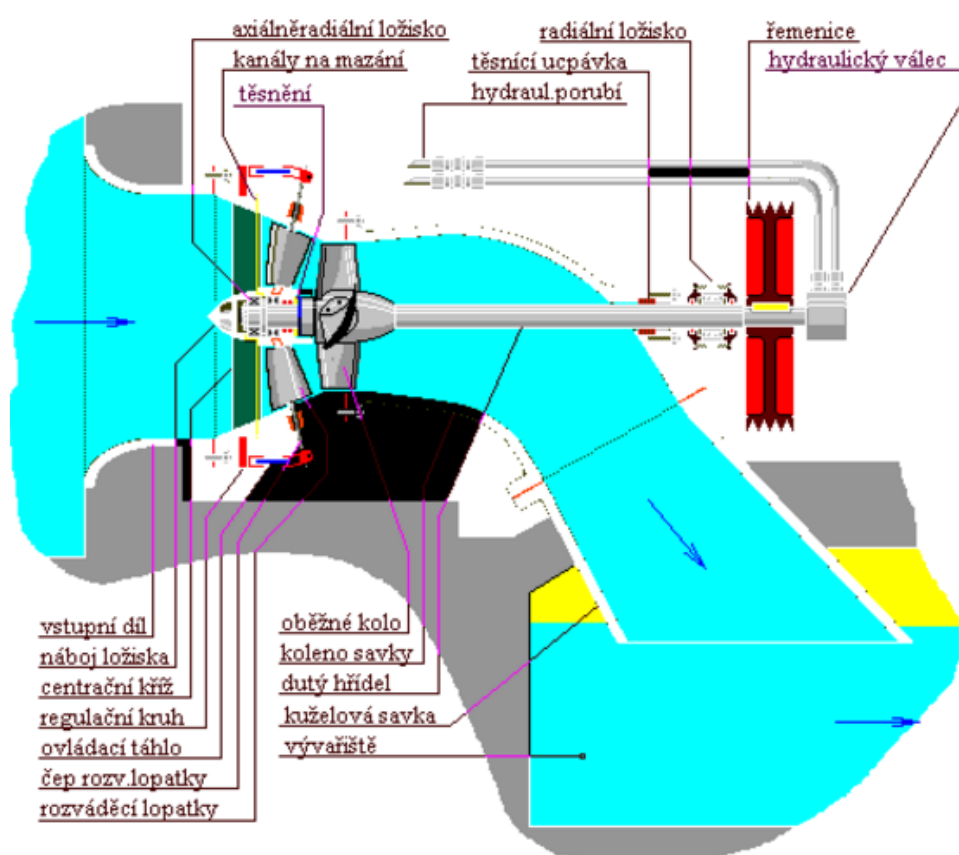
### 9.1.2 Kaplanova turbína

Používá se pro velmi nízký spád a vysoký průtok vody. Tento typ turbíny může díky dvojité regulaci zpracovávat větší rozsah průtoků při příznivé účinnosti. První stupeň regulace se uskutečňuje pomocí natáčení regulovatelných lopatek přivaděče vody, druhý stupeň regulace je umožněn natáčením lopatek oběžného kola, což zvyšuje hodnotu střední účinnosti v rozsahu běžného provozu.

Možnost nastavení optimální vazby otevření oběžného kola a rozvaděče zaručuje příznivé průtokové poměry a snížení tlakových pulzů na výstupu z oběžného kola, čímž se zároveň zlepšuje dynamické chování turbíny. Nevýhodou této turbíny je relativně vysoká hodnota kavitačního součinitele.

Kaplanovy turbíny mají několik variant řešení:

- Axiální neregulovatelná – Oběžné i rozváděcí lopatky jsou pevné
- Propelerová – Oběžné lopatky jsou pevné, rozvádění lopatky jsou natáčivé
- Thomannova – Oběžné lopatky jsou natáčivé, rozváděcí pevné.



Obrázek 8-Schéma Kaplanovy turbíny[10]

## 9.2 Rovnotlaké turbíny

V rovnotlakých turbínách se celá hodnota tlakové měrné energie mění v zařízení na přívod vody k oběžnému kolu na kinetickou měrnou energii. Stejný tlak je na vstupu a výstupu oběžného kola. Proud vody v nich úplně nevyplní průtočné kanály oběžného kola, které musí mít okolí zaplněné vzduchem.

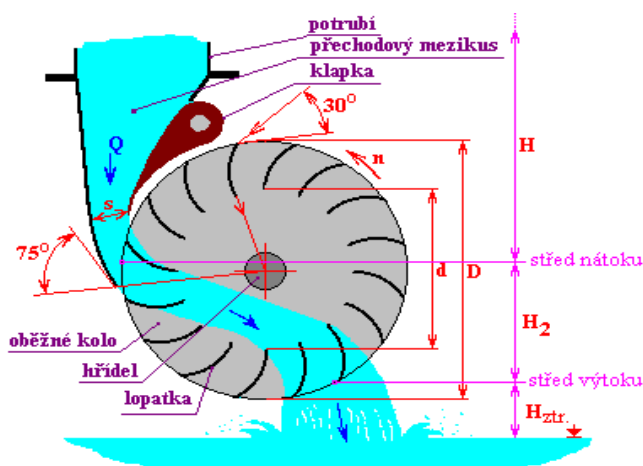
V případě, že je tlak vzduchu stejný jako tlak atmosférický, nesmí se při aplikování těchto turbín umístit oběžné kolo pod spodní hladinu vody. Voda by totiž částečně vnikala do zaplněných průtočných kanálů a narušovala by tím charakter proudění a zhoršovala účinnost. Charakteristickou vlastností rovnotlakých turbín je konstantní hodnota průtoku při zvyšujících se otáčkách.

### 9.2.1 Bánkiho turbína

Je turbína s dvojnásobným průtokem kapaliny oběžným kolem. Oběžné kolo má lopatky vytvořené z kruhově prohnutých desek, osazených mezi paralelní kotouče. Vstup do vody je dostředivý a výstup odstředivý. Průtok a výkon se reguluje regulačním orgánem řešeným jako segmentový uzávěr nebo regulační klapka, které jsou součástí vstupního tělesa.

Aby byla dosažena optimální účinnost je regulační orgán po svojí délce dělený tak, jako oběžné kolo. Manipulací jednotlivých sekcí se dosáhne plynulé regulace průtoku a relativně ploché křivky průběhů účinností.

Bánkiho turbíny se uplatňují už při spádu vody nižších jako 2 metry, nebo dosahují výšky až 100 metrů. Mohou využívat velkou různorodost průtoků, a to při konstantním průměru turbíny tím, že se mění velikost vstupu a výstupu vody a šířka oběžného kola. Poměr šířky a průměru kola se pohybuje od 0,2 do 4,5. Vzhledem k nízké ceně a jednoduché obsluze se tyto turbíny velmi dobře uplatňují v MVE.



Obrázek 9-Schéma Bánkiho turbíny[10]

### 9.2.2 Peltonova turbína

Peltonova turbína je nejčastěji používaným typem rovnotlaké turbíny. Vyznačuje se relativně jednoduchostí hydraulického a konstrukčního řešení. Nachází použití hlavně při větších spádech a menších objemových průtocích.

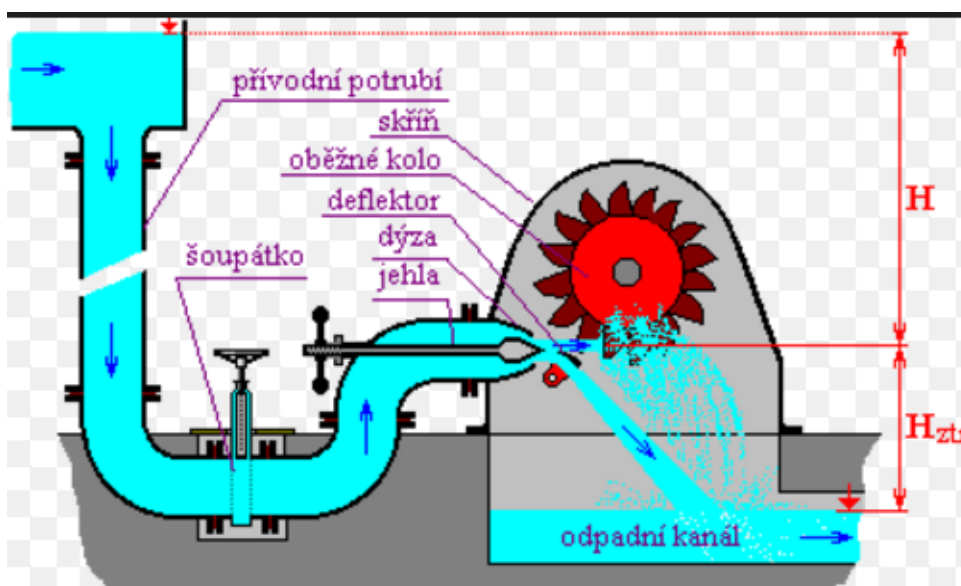


Rozvodné ústrojí tvoří dýza, z které ve tvaru volného paprsku kruhového průřezu vystupuje voda ostřikující osově rozdělení lopatky oběžného kola. V dýze se přemění celková měrná energie na měrnou energii kinetickou. Podle výkonu turbíny se používá konstrukční řešení s jednou až šesti dýzami. Oběžné lopatky ve tvaru dvojitého křídla jsou pevné.

Regulace výkonu změnou průtoků se provádí otevíráním nebo zavíráním výtokového otvoru dýzy přímočarým pohybem regulační jehly. K rychlému odstavení provozu se využívá zařízení na odklánění nebo odřezávání vodního paprsku, takzvaného deviátoru nebo deflektoru, jehož pohyb je kombinován s pohybem regulační jehly. Uspořádání soustrojí bývá horizontální, při více jak dvou dýzách vertikální.



Obrázek 10-Oběžné lopatky Peltonovy turbíny[11]



Obrázek 11-Schéma Peltonovy turbíny[10]

## 10. ZÁKLADNÍ ELEKTRICKÉ ZAŘÍZENÍ VODNÍCH ELEKTRÁREN

Tato kapitola je zpracována z [13,5,2]

Už při návrhu stavební části vodní elektrárny je potřeba poznat druh a rozsah elektrického zařízení. Základními prvky elektrického systému MVE jsou:

- Generátor, gen. vypínač
- Vývody z generátoru
- Blokový transformátor
- Vývody z transformátoru
- Vnější rozvodna (může i nemusí být)
- Transformátor vlastní spotřeby
- Elektrické motory různých zařízení
- Pomocné zařízení (vypínače, jističe apod.)

Samotnou přeměnu mechanické energie na elektrickou, dodávané ve formě točivého momentu z rotující hřídele vodního stroje, zabezpečuje elektrický stroj-generátor. Je připojený prostřednictvím přenosového a obvykle i transformačního zařízení k místu vyvedení výkonu-spotřeby. Vyrobenou elektrickou energii je potřebné okamžitě spotřebovat, prakticky se nedá akumulovat.

### 10.1 Elektrické generátory

Elektrické generátory jsou elektrické rotační stroje, které mění mechanickou energii rotujícího hřídele na energii elektrickou. Podle napěťových hladin lze generátory dělit na:

- Vysokonapěťové – hodnota napětí do 1kV
- Nízkonapěťové – hodnota napětí od 50 do 1000 V

Jestliže chceme určit, na jaké napěťové hladině bude navrhnutý generátor pracovat, musíme brát v úvahu výkon turbín. Nízkonapěťové generátory se používají od nejnižších výkonů, maximálně do 1 MW. Pro větší výkony se používají vysokonapěťové generátory, kdy při vyšší napěťové hladině dochází k menším ztrátám, jako při použití generátoru zbývajících výkonů při nízkém svorkovém napětí.

Většina MVE využívá na přeměnu elektrické energie generátory se střídavým proudem. Dělí se na generátory:

- Synchronní
- Asynchronní

Volba mezi uvedenými typy generátorů je ve většině případů podmíněná jednak požadavky provozovatele MVE a takéž provozovatelem distribuční sítě, který určuje, za jakých technických podmínek bude MVE připojena.

### 10.1.1 Synchronní generátor

Je elektrické točivé zařízení, které má stator se střídavým třífázovým vinutím a rotor s jednosměrným budícím vinutím. Konstrukční provedení vychází z napěťové, resp. výkonové hladiny generátoru a počtu pólů, který musí být stejný pro rotor i stator zvoleného generátoru. Podle tohoto počtu se společně s frekvencí sítě určují tzv. synchronní otáčky generátoru, vyjádřené vztahem:

$$n = \frac{f \cdot 60}{p} \quad (10.1)$$

Kde  $n$ ...jsou synchronní otáčky generátoru

$f$ ...sít'ové frekvence

$p$ ...počet pólových dvojic daného generátoru

Rotor synchronního generátoru se otáčí rychlostí synchronních otáček a vytváří tak točivé magnetické pole. Magnetické pole indukuje proud ve třech statorových jednofázových vinutích-fázích, posunutých navzájem o úhel  $120^\circ$ . Rotor synchronního stroje je ještě realizován tlumícím vinutím, které zabraňuje asymetrii a kolísání elektrických veličin generátoru. Stejnoseměrný budící proud se do rotoru synchronního stroje přivádí přes kroužky a kartáče, nebo přímo hřídelí, pokud je budič umístěn na hřídeli.

### 10.1.2 Fázování synchronního generátoru

Připojení generátoru k síti je možné pouze za splnění následujících podmínek:

- Synchronizace napětí – znamená, že se hodnota napětí sítě a na svorkách generátoru musí rovnat
- Synchronizace frekvence – znamená, že se úroveň frekvence sítě a generátoru musí rovnat
- Synchronizace fáze nebo samosynchronizace – připojení generátoru k síti v přibližně synchronních otáčkách v nenabuzeném stavu a následném nabuzení.

Samosynchronizací vzniká proudový impuls 2,5 až 3krát větší, než je jmenovitý proud.

### 10.1.3 Asynchronní generátor

Asynchronní generátor se používá především v režimu výroby a dodávky elektrické energie MVE do tvrdé sítě elektrizační soustavy, neboť v opačném případě, popř. ostrůvků jej nelze použít. Důvod spočívá v samotném vytvoření magnetického pole v statorovém vinutí, které je zajištěno pomocí jalového výkonu. Ten se získává z tvrdé sítě. Stator má třífázové střídavé vinutí, stejné jako synchronní generátor.

### 10.1.4 Fázování asynchronního generátoru

Fázování asynchronního generátoru je na rozdíl od synchronního jednodušší, a to připojením generátoru k síti při dosažení přibližně synchronních otáček. Taktéž síti vzniká proudový náraz jako při fázování synchronního generátoru působením samosynchronizace.

## 11. VÝBĚR LOKALITY

Tato kapitola je zpracována z [13,14,15]

Navrhuji malou vodní elektrárnu, která se bude nacházet na řece Olše v katastrálním území Bukovec, okres Frýdek-Místek. Roční provoz je 95 % a to z důvodu nutných odstávek na údržbu.

### 11.1 Hydrologické údaje lokality

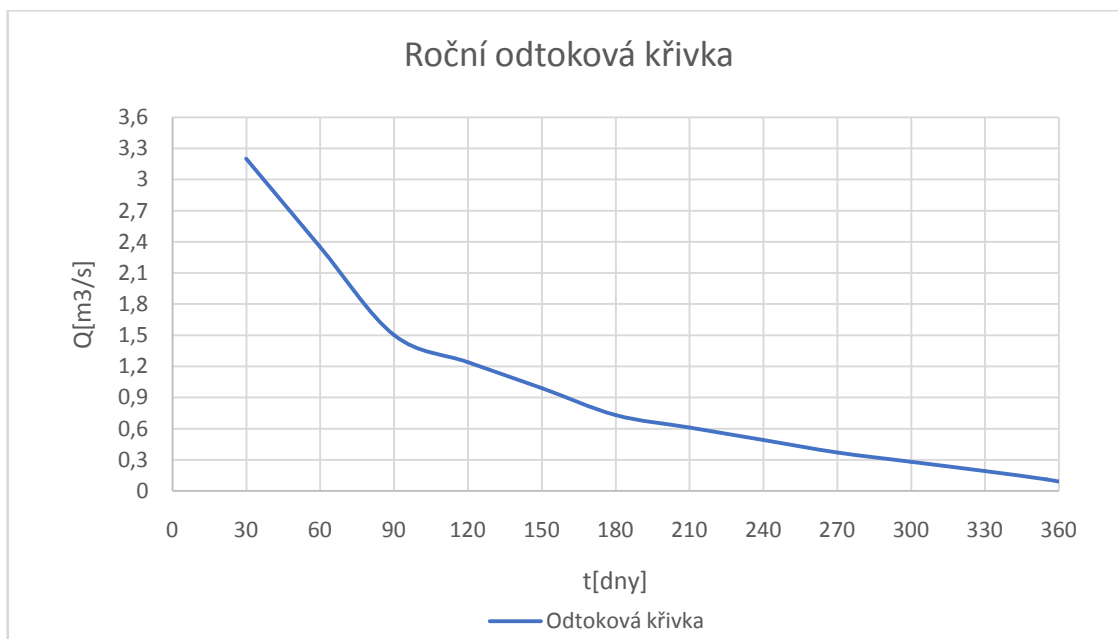
Asanační průtok: **0,15 m<sup>3</sup>/s**

Spád: **3,8 m**

t[dny]	30	60	90	120	150	180	210	240	270	300	330	355	364
Q[m <sup>3</sup> /s]	3,2	2,35	1,5	1,24	0,99	0,73	0,61	0,49	0,37	0,28	0,19	0,11	0,07

Tabulka 1 - Tabulka odtokové křivky

Aby byla odtoková křivka lépe vidět tak jsem z hodnot udělal graf.



Obrázek 12- Roční odtoková křivka pro lokalitu řeky Olše

## 12. NÁVRH STROJNÍ ČÁSTI MVE

Tato kapitola je zpracována z [13,14,15]

Turbína se podle odtokové křivky bude dimenzovat na 90 až 120 denní průtok, jelikož za touto oblastí začíná křivka rapidně stoupat. Určení středního průtoku mezi 90 až 120 denním průtokem:

$$Q_{stř} = \frac{(Q_{(120)} - Q_{asn}) + (Q_{(90)} - Q_{asn})}{2 \cdot počet\ turbín} \quad (12.1)$$

$$Q_{stř} = \frac{(1,24 - 0,15) + (1,5 - 0,15)}{2 \cdot 1}$$

$$Q_{stř} = 1,22 \text{ m}^3/\text{s}$$

Kde  $Q_{(120)}$ ...120 denní průtok

$Q_{(90)}$ ...90 denní průtok

$Q_{asn}$ ...asanační průtok

### 12.1 Hydroenergetické řešení MVE

Práci nám vykonává voda, která protéká z horní části do dolní části. Teoretický výkon se dá vypočítat ze vzorce:

$$P = \rho \cdot g \cdot H \cdot Q \text{ [W]} \quad (12.2)$$

Kde  $\rho$ ...hustota vody  
 $g$ ...gravitační zrychlení  
 $Q$ ...průtok vodním motorem  
 $H$ ...spád využitý vodní elektrárnou

Aby byl výpočet správný, je třeba nejdříve určit průměrný průtok danou lokalitou. Tento průtok určíme z tvaru průtokové křivky a asanačního průtoku. Tento průtok jsem určil vzorcem (12.1) a jeho hodnota je  $1,22 \text{ m}^3/\text{s}$ . Díky tomuto průtoku získám největší obsah pod průtokovou křivkou. Dosazení hodnot do vzorce (12.2):

$$P = \rho \cdot g \cdot H \cdot Q_{stř} = 1000 \cdot 9,81 \cdot 1,22 \cdot 3,8 = 45,48 \text{ kW}$$

Kde  $\rho$ ...hustota  
 $g$ ...gravitační zrychlení  
 $H$ ...spád  
 $Q_{stř}$ ...střední průtok

Tento výkon je pouze teoretický. Pro zjištění skutečného výkonu musíme do vzorce (12.2) ještě započíst účinnosti turbíny, účinnost převodu, účinnost elektrického generátoru. Nesmíme zapomenout ani na účinnost transformátoru ta se pohybuje mezi hodnotami  $\eta_{tr}=0,92$  až  $0,98$ . Mechanický výkon odevzdává turbína v generátoru, kde se přeměňuje na elektrický. Generátor díky vlastním ztrátám má účinnost  $\eta_g=0,85$  až  $0,97$ . Generátor bude spojen s turbínou pomocí řemene a proto  $\eta_p=0,97$ . Při návrhu budu používat turbínu Bánkiho, a proto bude účinnost turbíny  $\eta_t=0,80$ . Celková účinnost se potom vypočte vztahem:

$$\eta_c = \eta_{tr} \cdot \eta_g \cdot \eta_t \cdot \eta_p = 0,94 \cdot 0,9 \cdot 0,8 \cdot 0,97 = 0,66 \quad (12.3)$$

Kde  $\eta_{tr}$ ...účinnost transformátoru  
 $\eta_g$ ...účinnost generátoru  
 $\eta_t$ ...účinnost Bánkiho turbíny  
 $\eta_p$ ...účinnost převodu

Výkon na prahu elektrárny je:

$$P = g \cdot Q_{stř} \cdot H \cdot \eta_c = 9,81 \cdot 1,22 \cdot 3,8 \cdot 0,66 = 30,02 \text{ kW} \quad (12.4)$$

Kde  $g$ ...gravitační zrychlení

$Q_{\text{stř}}$ ...střední průtok

$H$ ...spád

$\eta_c$ ...celková účinnost

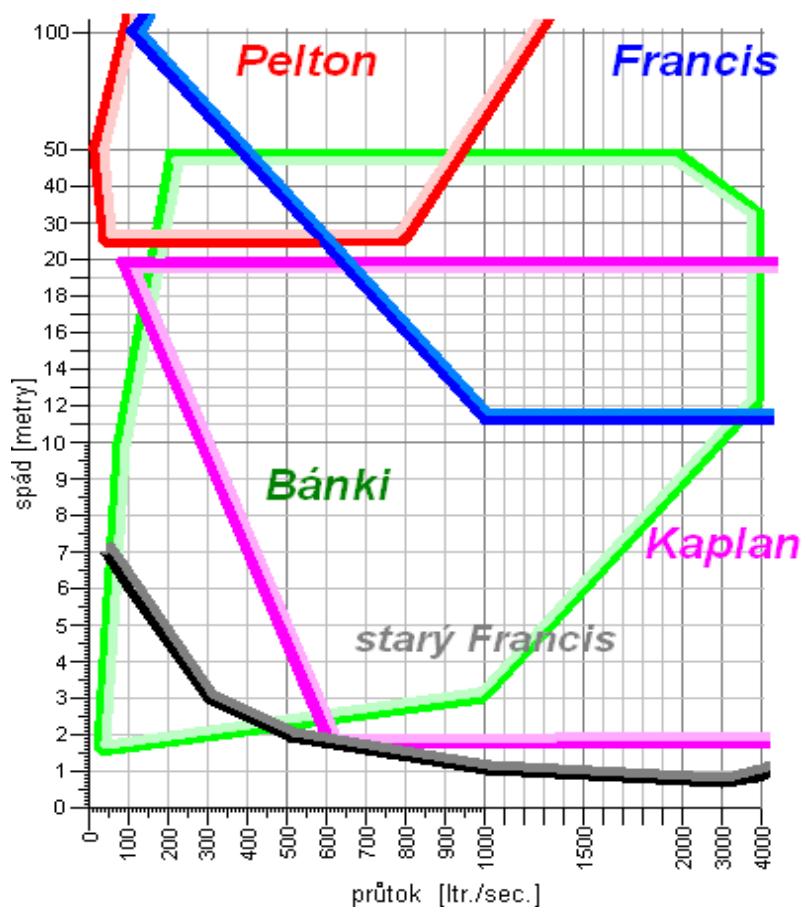
### 13. NÁVRH TURBÍNY

Tato kapitola je zpracována z [1,4,6,14,15]

Při výběru správné turbíny jsem se rozhodoval mezi turbínou Kaplanovou a Bánkiho. Kaplanova turbína je dražší, protože je náročnější na výrobu. Také jsou v mé lokalitě dosti malé průtoky, a proto jsem jako vhodnější zvolil turbínu Bánkiho. Tato turbína má široké využití, a to především na malých tocích. Tato turbína je taky vhodná pro kolísavé průtoky.

Konstrukční parametry Bánkiho turbíny:

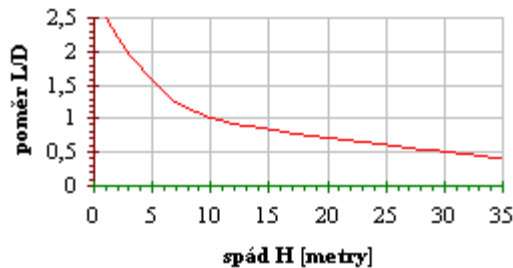
Doporučený počet lopatek je 32 ks. Voda, která vtéká do kola, musí stékat po zakřivené stěně, a to tak, aby v okamžiku vstupu svírala s kolmicí vedenou od okraje kola do středu hřídele úhel 75 %. Oběžné kolo se otáčí ve skříni volně, prostor je zavzdušněn a vstupní hrana lopatky je přiosťřena a míří do středu hřídele.



Obrázek 13-Použitelnosti turbín závislá na spádu a průtoku[10]

### 13.1 Výpočet parametrů turbíny

Abychom stanovili správně rozměry, je důležité zvolit vhodný poměr mezi šířkou oběžného kola a jeho průměrem  $D$ . Tento poměr se nazývá součinitel  $k_{ld}$ .



Obrázek 14-Graf součinitele  $k_{ld}$ [10]

Hodnota  $k_{ld}$  pro můj spád 3,8m se rovná 1,8.

Vstupní rychlost vody  $c_1$ :

$$c_1 = 0,98 \cdot \sqrt{19,81 \cdot H} = 0,98 \cdot \sqrt{19,81 \cdot 3,8} = 8,5 \text{ m/s} \quad (13.1)$$

Kde  $H$ ...spád

Plocha štěrbiny  $a$ :

$$a = \frac{Q}{c_1 \cdot 1000} = \frac{1220}{8,5 \cdot 1000} = 0,14 \text{ m}^2 \quad (13.2)$$

Kde  $Q$ ...průtok v litrech za sekundu

$c_1$ ...vstupní rychlost vody

Největší otevření štěrbiny  $s$ :

$$s = 1000 \cdot \sqrt{\frac{a \cdot k_{ostř}}{k_{ld}}} = 1000 \cdot \sqrt{\frac{0,14 \cdot 0,2}{1,8}} = 125 \text{ mm} \quad (13.3)$$

Kde  $a$ ...plocha štěrbiny

$k_{ostř}$ ...součinitel ostříku

$k_{ld}$ ...poměr mezi šířkou oběžného kola a jeho průměrem

Kde  $k_{ostř}$  je součinitel ostříku a ten je pro Bankiho turbínu  $k_{ostř}=0,2$

Vnější průměr oběžného kola  $D$ :



$$D = \frac{s}{k_{ostř}} = \frac{125}{0,2} = 625 \text{ mm} \quad (13.4)$$

Kde  $s$ ...největší otevření šterbiny

$k_{ostř}$ ...součinitel ostříku

Vnitřní průměr  $d_2$ :

$$d_2 = D \cdot 0,66 = 413 \text{ mm} \quad (13.5)$$

Kde  $D$ ...vnější průměr oběžného kola

Délka šterbiny  $L$ :

$$L = D \cdot k_{ld} = 625 \cdot 1,8 = 1125 \text{ mm} \quad (13.6)$$

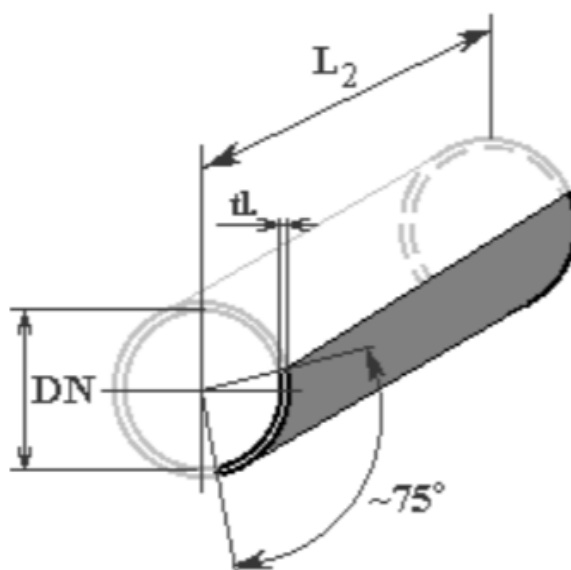
Kde  $D$ ...vnější průměr oběžného kola

$k_{ld}$ ...poměr mezi šířkou oběžného kola a jeho průměrem

Délka lopatky  $L_2$  tato délka by měla být vyšší o 5 mm – 15 mm než délka šterbiny:

$$L_2 = L + 10 = 1125 + 10 = 1135 \text{ mm} \quad (13.7)$$

Tyto lopatky se nejčastěji vyrábí podélným výřezem z trubky:



Obrázek 15-Podélný výřez trubky[10]

Světlost DN této trubky:

$$DN = 0,326 \cdot D - 2 \cdot tl = 0,326 \cdot 625 - 2 \cdot 4 = 196 \text{ mm} \quad (13.8)$$

Kde  $D$ ...vnější průměr oběžného kola

Tloušťka trubky se v praxi volí podle nejbližšího typizovaného průměru.

Jmenovité otáčky turbíny n:

$$n = 9898 \cdot \frac{c_1}{D} = 9898 \cdot \frac{8,5}{625} = 135 \text{ ot/min} \quad (13.9)$$

Kde  $c_1$ ...vstupní rychlost vody

D...vnější průměr oběžného kola

Přibližný průměr hřídele  $d_h$ :

$$d_h = 160 \cdot \sqrt[3]{\frac{H \cdot Q}{75 \cdot n}} = 160 \cdot \sqrt[3]{\frac{3,8 \cdot 1220}{75 \cdot 135}} = 122,1 \text{ mm} \quad (13.10)$$

Kde H...spád

Q...průtok

n...otáčky turbíny

Výpočet mechanického výkonu na hřídeli turbíny:

$$P_{turbíny} = g \cdot H \cdot Q \cdot \eta_t = 9,81 \cdot 3,8 \cdot 1,22 \cdot 0,8 = 36,38 \text{ kW} \quad (13.11)$$

Kde H...spád

$\eta_t$ ...účinnost turbíny

Q...průtok

g...gravitační zrychlení

Parametr	Hodnota
$P_{turbíny}$	36,38 kW
N	135 ot/min
D	625 mm
$d_2$	413 mm
L	1125 mm
$L_2$	1135 mm
S	125 mm
DN	196 mm
$d_h$	122,1 mm
$c_1$	8,5 m/s
A	0,14 m <sup>2</sup>

Tabulka 2 - Vypočtené parametry turbíny

## 13.2 Vlastní konstrukce turbíny

Hlavní konstrukční celky Bánkiho turbíny jsou oběžné kolo, hřídel, základový rám turbíny a výpust turbíny.

Oběžné kolo je složeno z lopatek a bočních čel. Lopatky se vyrobí z pásoviny s potřebnou šířkou a tloušťkou, která se potom lisováním získá požadovaný poloměr zakřivení. Aby nedocházelo ke ztrátám zvržení je důležité, aby lopatky na náběžné a odtokové hraně byly tenčí jak ve středu. Malá drsnost povrchu lopatek podstatně sníží ztráty třením proudu vody v mezi lopatkových kanálech a bude mít příznivý účinek na dosažení vyšší účinnosti. Každá lopatka musí být stejně dlouhá. Lopatky se s čelem spojí svařením. Lopatky se budou svářet tak, že se obě čela nasadí na hřídel, čím se zaručí jejich souosost a zabezpečí se stejná poloha a úhel nastavení všech lopatek. Lopatky musí být rovnoběžné s hřídelem.

Čelo oběžného kola se skládá z kotouče a náboje. Kotouč se vyrobí soustružením z plechového polovýrobku a náboje soustružením z tyčového materiálu. V náboji se nachází drážka na péro, která slouží na přenos krouticího momentu z oběžného kola na hřídel. Kotouč se s nábojem svaří.

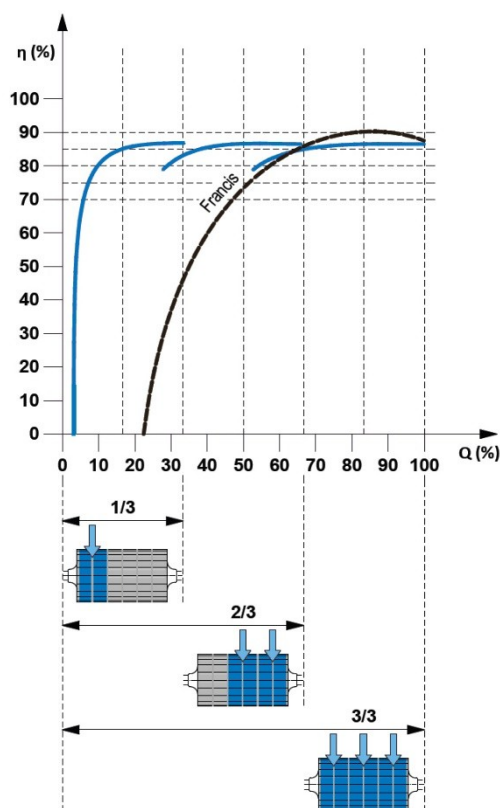
Hřídel Bánkiho turbíny je namáhaná hlavně na krouticí moment. V hřídeli jsou tři drážky na uložení pera přenášejícího krouticí moment. Dvě pera se používají na přenos krouticího momentu z náboje oběžného kola na hřídel, třetí péro s dvojnásobnou délkou se využije na přenos krouticího momentu z hřídele na řemenici. Hřídel musí být vyrobena přesně dle tolerancí uložení na ložiska. Aby hřídel nepředstavoval překážku proudu vody v oběžném kole, tak bude dělený. To znamená, že každá část hřídele je přivařená k čelu oběžného kola. Lopatky proto přenesou polovinu krouticího momentu, a proto na to musí být naddimenzovány. Hřídel je uložena v kluzných ložiskách.

Základový rám je nositelem celé konstrukce generátoru s Bánkiho turbínou. Nese oběžné kolo, výpust, převodové ústrojí, generátor, krycí plechy oběžného kola a převodu a také regulační mechanismy turbíny. Základový rám musí být vyroben dostatečně rovně, aby byla dosažena co nejlepší těsnost. Aby byla těsnost ještě lepší, bude zde gumové těsnění. Na základní rám se upevní dvě boční víka, která nesou oběžné kolo. Tyto víka budou vyrobena z plechu o tloušťce 8mm a přivaříme je k rámu. Do nich bude udělán větší otvor na nasunutí hřídele a čtyři otvory se závitem na připevnění ložiskových pouzder. Na základovém rámu se nachází i výpust turbíny. Jsou spojeny nerozebratelně (svařením) s rámem. Tím dosáhneme vodotěsné výpustě. Základový rám nese i kryt na oběžné kolo, který toto kolo zakrývá s ostrými hranami lopatek a snižuje i ventilační ztráty při jeho otáčení.

### 13.3 Princip dvoukomorové průtokové vodní turbíny

Pro svou malou vodní elektrárnu volím dvoukomorovou průtokovou turbínu, a to kvůli proměnlivým průtokům. Jedná se o radiální průtokovou turbínu, která bývá často lehce přetlaková. Proud vody musí projít přes nátokové potrubí a regulační klapky a poté voda vstupuje na lopatky oběžného kola tangenciálně. Jakmile voda projde oběžným kolem, vystupuje voda na opačné straně a díky tomu zvyšuje účinnost turbíny. Voda odchází buď samovolně nebo v případě potřeby sávkou do vývaru pod turbínou. Rozdělení nátokových komor je v poměru 1:2. Na užší komoře je zpracováván malý průtok vody, a na širší komoře je zase zpracováván střední průtok. Pokud dojde k plnému průtoku, tak pracují obě komory společně. Díky tomu lze s maximální účinností využívat průtoky v rozsahu od 12 % do 100 %. Turbína je schopna pracovat již tehdy, když je průtok pouze 6 % z návrhového průtoku.

Obrázek 17 ukazuje výhody průtokové turbíny v oblasti částečného zatížení. Říční toky mají často několik měsíců v roce velmi malý průtok. Možnost v těchto měsících vyrábět elektrickou energii záleží na charakteristice průběhu účinnosti příslušné turbíny. Turbíny s vysokým špičkovým stupněm účinnosti, ale nevýhodnou účinností při nižších průtocích vody, dosahují v místech s kolísavým průtokem vody nižší roční výrobu, než turbíny s plochou křivkou účinnosti.



Obrázek 16-Průběh účinnosti průtokové turbíny, složený z 3 křivek účinnosti při regulaci dělenou regulační klapkou v poměru 1.2 ve srovnání s Francisovou turbínou[1]

### 13.4 Regulace Bánkiho turbíny

Regulovat se bude průtok turbínou. U Bánkiho turbíny se regulace provádí tzv. regulačními klapkami. U dělené průtokové turbíny jsou dvě silově vyvážené profilové regulační klapky. Mají za úkol rozdělit a vyrovnat vodní paprsek, aby mohl plynule vstoupit do prostoru oběžného kola. Obě otočné i regulační klapky jsou přesně usazeny do skříně komory a slouží i jako uzavírací armatura. Obě regulační klapky jsou nezávisle na sobě osazeny prodlouženými rameny, ke kterým je připojena automatická regulace. Tyto klapky jsou uloženy v odolných kluzných ložiskách, a proto jsou bezúdržbové. V případě že dojde k odpojení od sítě je tedy nouzové uzavření turbíny, a to díky připojení závaží na konci ramene. Turbína bude mít tři možnosti, jak přivést vodu na oběžné kolo.

- Plný průtok turbínou - regulační klapky jsou otevřené
  - je to maximální průtok turbínou ( $Q=1,22 \text{ m}^3/\text{s}$ )
- Střední průtok turbínou - menší klapka se uzavře a větší otevře
  - průtok je roven  $2/3$  maximálního průtoku ( $Q=0,81 \text{ m}^3/\text{s}$ )
  - to odpovídá dle odtokové křivky 170 dnům v roce
- Malý průtok turbínou - menší klapka je otevřena a větší uzavřena
  - průtok je roven  $1/3$  maximálního průtoku ( $Q=0,41 \text{ m}^3/\text{s}$ )
  - to odpovídá dle odtokové křivky 260 dnům v roce

Chceme-li nyní vypočítat výkon Bánkiho turbíny pro střední a malý průtok použijeme následující vzorec:

$$P_{\text{střední}} = g \cdot H \cdot Q \cdot \eta_T = 9,81 \cdot 3,8 \cdot 0,81 \cdot 0,8 = 24,17 \text{ kW} \quad (13.12)$$

$$P_{\text{malý}} = g \cdot H \cdot Q \cdot \eta_T = 9,81 \cdot 3,8 \cdot 0,41 \cdot 0,8 = 12,23 \text{ kW} \quad (13.13)$$

Kde  $g$ ...gravitační zrychlení

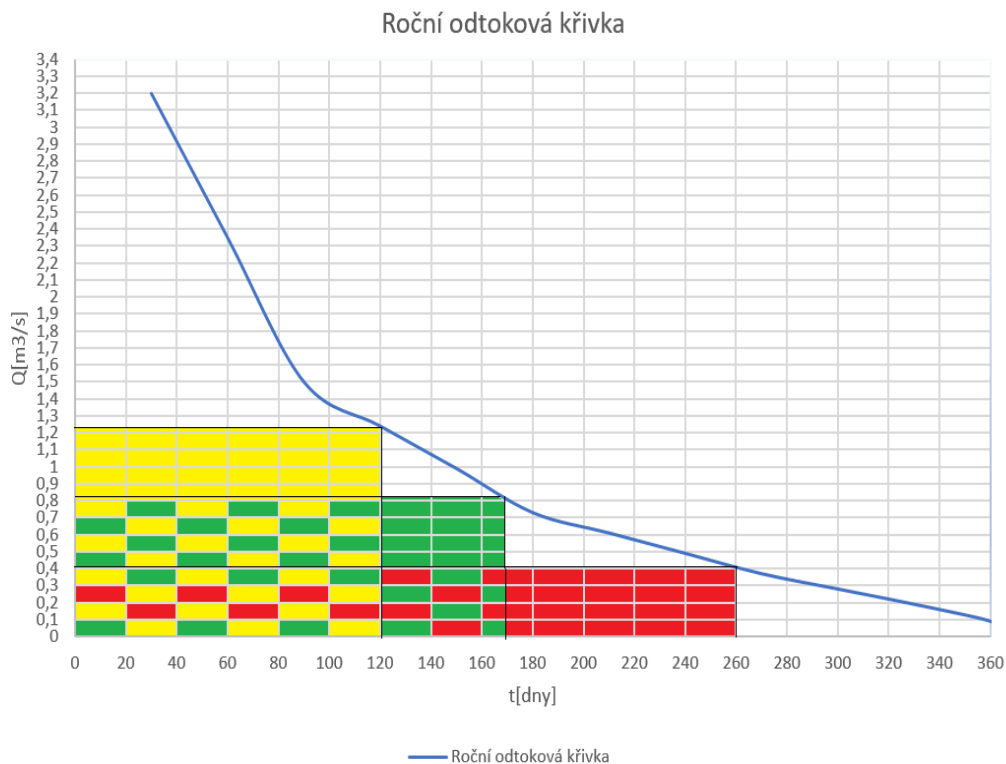
$H$ ...spád

$Q$ ...průtok

$\eta_T$ ...účinnost turbíny

Průtok turbínou	Účinnost [%]	Průtok [ $\text{m}^3/\text{s}$ ]	Výkon [kW]
Plný průtok	80	1,22	36,38
Střední průtok	80	0,81	24,17
Malý průtok	80	0,41	12,23

Tabulka 3 - Regulace Bánkiho turbíny



Obrázek 17-Odtoková křivka s vyznačením pokrytí s regulací

### 13.5 Stanovení množství vyrobené elektrické energie

Toto množství se určí z daného výkonu a četnosti dní a hodin, ve kterých elektrárna bude pracovat.

$$A_{el-120} = P_{el-120} \cdot \Delta\tau \cdot 24 = 36,38 \cdot 120 \cdot 24 = 104\,774 \text{ kWh} \quad (13.14)$$

Kde  $P_{el-120}$ ...výkon pro 120 denní provoz

$\Delta\tau$ ...počet dní ve kterých elektrárna pracuje

#### Skutečné množství vyrobené elektrické energie

$$A_{el.skut.-120} = A_{el-120} \cdot \vartheta = 104774 \cdot 0,95 = 99536 \text{ kWh} \quad (13.15)$$

Kde  $A_{el-120}$ ...množství vyrobené elektrické energie

$\vartheta$ ...roční odstávka provozu z důvodu údržby

#### Množství vyrobené elektrické energie s regulací průtoku

$$A_{el-170} = P_{el170} \cdot \Delta\tau \cdot 24 = 24,17 \cdot 50 \cdot 24 = 29004 \text{ kWh} \quad (13.16)$$

Vypočet je skoro stejný, akorát musíme připočítat energii, kterou získáme regulací.

$$A_{el.skut.-170} = A_{el-170} \cdot \vartheta = 29004 \cdot 0,95 = 27554 \text{ kWh} \quad (13.17)$$

$$A_{el.-260} = P_{el260} \cdot \Delta\tau \cdot 24 = 12,23 \cdot 90 \cdot 24 = 26417 \text{ kWh} \quad (13.18)$$

$$A_{el.skut.-260} = A_{el-260} \cdot \vartheta = 26417 \cdot 0,95 = 25096 \text{ kWh} \quad (13.19)$$

$$A_{el.r} = A_{el.skut.-120} + A_{el.skut.-170} + A_{el.skut.-260} \quad (13.20)$$

$$A_{el.r} = 99536 + 27554 + 25096 = 152186 \text{ kWh}$$

Kde  $P_{el170}$ ...výkon pro 170 denní provoz

$P_{el260}$ ...výkon pro 260 denní provoz

$\Delta\tau$ ...počet dní ve kterých elektrárna pracuje

$\vartheta$ ...roční odstávka provozu z důvodu údržby

$A_{el-170}$ ...množství vyrobené elektrické energie

$A_{el-260}$ ...množství vyrobené elektrické energie

$A_{el.skut.-170}$ ...skutečné množství vyrobené elektrické energie

$A_{el.skut-260}$ ...skutečné množství vyrobené elektrické energie

### Provozní spotřeba elektrické energie

Je to energie, kterou elektrárna potřebuje ke svému provozu. Nejčastěji to bývají systémy pro řízení elektrárny, celkové zabezpečení elektrárny a světla. V literatuře se udává jedno procento z ročního množství vyprodukované energie:

$$A_{ps} = \frac{A_{el.r}}{100} = \frac{152186}{100} = 1522 \text{ kWh} \quad (13.21)$$

Kde  $A_{el.r}$ ...množství vyrobené elektrické energie za rok

## 14. ODHAD INVESTIČNÍCH NÁKLADŮ

Tato kapitola je zpracována z [12,15]

Neprovádím ve své práci detailní návrh jednotlivých součástí malé vodní elektrárny, proto nemůžu určit přesné náklady, a tak musím použít měrné investiční náklady uvedené ve vyhlášce č. 296/2015 Sb. Tato vyhláška nabyla účinnosti dne 1. ledna 2016.

Součinitele instalovaného výkonu:

$$K_{CR} = \frac{P_{Cr}}{P_I} = \frac{A_{el.r}}{24 \cdot 365 \cdot 36,38} = 0,48 \quad (14.1)$$

Kde  $P_{Cr}$ ...průměrný celoroční výkon

$P_I$ ...instalovaný výkon

$A_{el,r}$ ...množství vyrobené elektrické energie za rok

### Roční využití instalovaného výkonu:

$$RV = K_{CR} \cdot 8760 = 0,48 \cdot 8760 = 4205 \text{ kWh/kWe} \quad (14.2)$$

Kde  $K_{CR}$ ...součinitel instalovaného výkonu

### Celkové investiční náklady:

Dle vyhlášky č. 266/2016 Sb. jsem zjistil, že ročnímu využití instalovaného výkonu 4205 kWh/kWe odpovídají měrné investiční náklady ve výši 130 000 Kč/kWe.

Charakteristika výroby elektřiny	Měrné investiční náklady [Kč/kWe]	Průměrné roční využití instalovaného výkonu za dobu životnosti [kWh/kWe]	Horní hranice rozsahu ročního využití instalovaného výkonu [kWh/kWe]
Malá vodní elektrárna v nových lokalitách	< 130 000	> 4 000	4 800
Malá vodní elektrárna ve stávajících lokalitách nebo rekonstruovaná	< 105 000	> 4 000	4 800

Obrázek 18-Vyhláška č.266/2016 Sb.[12]

$$N = MIN \cdot P_I = 130000 \cdot 36,38 = 4729400 \text{ Kč} \quad (14.3)$$

Kde  $N$ ...měrné investiční náklady

$P_I$ ...instalovaný výkon

### Odhadovaná doba návratnosti:

K určení správné doby návratnosti je potřeba zjistit výkupní cenu elektrické energie pro malé vodní elektrárny. Ta je dohledatelná na webu energetického regulačního úřadu.



ř./sl.	Podporovaný druh energie	Datum uvedení výroby do provozu		Jednotarifní pásmo provozování		Dvoutarifní pásmo provozování	
		od (včetně)	do (včetně)	Výkupní ceny [Kč/MWh]	Zelené bonusy [Kč/MWh]	Zelené bonusy [Kč/MWh]	
						VT	NT
a		b	c	j	k	n	o
100	Malá vodní elektrárna ve stávajících lokalitách	-	31. 12. 2004	2 110	1 470	1 785	1 186
101		1. 1. 2005	31. 12. 2013	2 705	2 065	2 555	1 693
102		1. 1. 2014	31. 12. 2014	2 652	2 012	-	-
103		1. 1. 2015	31. 12. 2015	2 600	1 960	-	-
104		1. 1. 2016	31. 12. 2016	2 549	1 909	-	-
105		1. 1. 2017	31. 12. 2017	2 214	1 574	-	-
110	Rekonstruovaná malá vodní elektrárna	-	31. 12. 2013	2 705	2 065	2 555	1 693
111		1. 1. 2014	31. 12. 2014	2 652	2 012	-	-
112		1. 1. 2015	31. 12. 2015	2 600	1 960	-	-
113		1. 1. 2016	31. 12. 2016	2 549	1 909	-	-
114		1. 1. 2017	31. 12. 2017	2 214	1 574	-	-
120	Malá vodní elektrárna v nových lokalitách	1. 1. 2006	31. 12. 2007	3 005	2 365	2 885	1 977
121		1. 1. 2008	31. 12. 2009	3 180	2 540	2 885	2 241
122		1. 1. 2010	31. 12. 2010	3 456	2 816	2 885	2 654
123		1. 1. 2011	31. 12. 2011	3 379	2 739	2 885	2 539
124		1. 1. 2012	31. 12. 2012	3 522	2 882	2 885	2 753
125		1. 1. 2013	31. 12. 2013	3 497	2 857	2 885	2 715
126		1. 1. 2014	31. 12. 2014	3 428	2 788	-	-
127		1. 1. 2015	31. 12. 2015	3 361	2 721	-	-
128		1. 1. 2016	31. 12. 2016	3 130	2 490	-	-
129		1. 1. 2017	31. 12. 2017	2 741	2 101	-	-

Obrázek 19-Výkupní cena elektrické energie[12]

**Příjmy za rok:**

$$Zr = (A_{el,r} - A_{ps}) \cdot V_c = (152186 - 1522) \cdot 2,741 = 412970 \text{ Kč} \quad (14.4)$$

Kde  $A_{el,r}$ ...množství vyrobené elektrické energie za rok

$A_{ps}$ ...provozní spotřeba elektrické energie

$V_c$ ...výkupní cena

**Doba návratnosti:**

Nejsnazší metodou pro zjištění doby návratnosti je podíl nákladů na investici a ročních příjmů z výkupu.

$$DN = \frac{N}{Zr} = \frac{4729400}{412970} = 11,5 \text{ let} \quad (14.5)$$

Kde  $N$ ...náklady na investici

$Zr$ ...příjmy za rok

Roky	Náklady	Příjmy	Návratnost
1	4729400	412970	-4316430
2	4729400	825940	-3903460
3	4729400	1238910	-3490490
4	4729400	1651880	-3077520
5	4729400	2064850	-2664550
6	4729400	2477820	-2251580
7	4729400	2890790	-1838610
8	4729400	3303760	-1425640
9	4729400	3716730	-1012670
10	4729400	4129700	-599700
11	4729400	4542670	-186730
12	4729400	4955640	226240
13	4729400	5368610	639210
14	4729400	5781580	1052180
15	4729400	6194550	1465150
16	4729400	6607520	1878120
17	4729400	7020490	2291090
18	4729400	7433460	2704060
19	4729400	7846430	3117030
20	4729400	8259400	3530000
21	4729400	8672370	3942970
22	4729400	9085340	4355940
23	4729400	9498310	4768910
24	4729400	9911280	5181880
25	4729400	10324250	5594850
26	4729400	10737220	6007820
27	4729400	11150190	6420790
28	4729400	11563160	6833760
29	4729400	11976130	7246730
30	4729400	12389100	7659700

Tabulka 4 - Doba návratnosti

### Diskontovaná doba návratnosti

Je to podobné kritérium jako u prosté doby návratnosti, ale rozdíl je v tom, že není založena na prostém peněžním toku, nýbrž na peněžním toku diskontovaném. Diskontovaný peněžní tok v roce  $t$  lze spočítat ze vzorce:

$$DCF = \frac{CF}{(1+r)^n} = \frac{412970}{(1+0,03)^1} = 400942 \text{ Kč} \quad (14.6)$$

Kde  $i$ ...diskont

$n$ ...rok, který se počítá

**Příjmy**

Příjmy v daném roce představují sumu diskontovaných ročních peněžních toků za daný rok a všechny předešlé.

$$Příjmy = \sum_{j=1}^1 DCF = 400942 \text{ Kč} \quad (14.7)$$

**Náklady**

Celkové náklady jsou již vypočteny a nemění se.

**Výnos**

$$Výnos = Příjmy - Náklady \quad (14.8)$$

$$Výnos = 400942 - 4729400 = -4328458 \text{ Kč}$$

**Návratnost**

Z tabulky lze vyčíst, že se návratnost bude pohybovat mezi 15 a 16 rokem. V této době přechází výnos do kladné části. Pro určení přesné hodnoty doby návratnosti je třeba použít zákonitosti pro směrnice tvaru přímky. Hledám výnos s hodnotou nula, a proto bude mít směrnice rovnice přímky tvar:

$$0 = k \cdot x + q \quad (14.9)$$

Tato rovnice se nyní musí upravit a dosadí se za k a q tyto rovnice:

$$k = \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1} \quad (14.10)$$

$$q = y_2 - k \cdot x_2 \quad (14.11)$$

Kde x... x-ová souřadnice bodu

y...y-ová souřadnice bodu

k...směrnice přímky

q...proměnná

Výsledná rovnice má potom tvar:

$$\text{Návratnost} = \frac{výnos_n - \frac{výnos_n - výnos_{n-1}}{rok_n - rok_{n-1}} \cdot rok_n}{\frac{výnos_n - výnos_{n-1}}{rok_n - rok_{n-1}}} \quad (14.12)$$

$$\text{Návratnost} = \frac{200609 - \frac{200609 - (-64460)}{15 - 14} \cdot 15}{\frac{200609 - (-64460)}{15 - 14}} = 14,2 \text{ let}$$

Roky	DCF	Příjmy	Náklady	Výnos
1	400942	400942	4729400	-4328458
2	389264	790206	4729400	-3939194
3	377926	1168132	4729400	-3561268
4	366918	1535050	4729400	-3194350
5	356232	1891282	4729400	-2838118
6	345856	2237138	4729400	-2492262
7	335782	2572920	4729400	-2156480
8	326002	2898923	4729400	-1830477
9	316507	3215430	4729400	-1513970
10	307288	3522718	4729400	-1206682
11	298338	3821056	4729400	-908344
12	289649	4110705	4729400	-618695
13	281212	4391918	4729400	-337482
14	273022	4664940	4729400	-64460
15	265070	4930009	4729400	200609
16	257349	5187359	4729400	457959
17	249854	5437212	4729400	707812
18	242576	5679789	4729400	950389
19	235511	5915300	4729400	1185900
20	228651	6143951	4729400	1414551
21	221992	6365943	4729400	1636543
22	215526	6581469	4729400	1852069
23	209248	6790717	4729400	2061317
24	203154	6993871	4729400	2264471
25	197237	7191108	4729400	2461708
26	191492	7382600	4729400	2653200
27	185915	7568514	4729400	2839114
28	180500	7749014	4729400	3019614
29	175242	7924256	4729400	3194856
30	170138	8094395	4729400	3364995

Tabulka 5 - Diskontovaná doba návratnosti

Z tabulky lze také určit výnosové procento. Jedná se o diskont, kdy NPV investice je rovná nule. Výnosové procento se získá pomocí citlivosti dat a funkce hledat řešení

v excelu. Hodnota diskontu vzrostla na 8 %. Výnosové procento je vyšší, a proto lze projekt realizovat.

## 15. EKOLOGIE

Tato kapitola je zpracována z [5,12,15]

Z hlediska ochrany životního prostředí je důležité vybrat vhodnou lokalitu tak, aby stavba nezpůsobila velký zásah do okolního prostředí. Také je důležité, aby celá elektrárna nenarušovala místní krajinný ráz. Pokud jsou při plánování a následné výrobě elektřiny dodržovány všechny normy a požadavky, vyznačují se vodní elektrárny velmi čistým provozem. Někteří lidé mají obavy ze znečištění vody ropnými produkty, avšak tyto problémy jsou neopodstatněné vzhledem k tomu, že v moderních provozech se používají ekologicky šetrná maziva samomazná ložiska. Když je vodní elektrárna správně vyřešená je pro ni charakteristická velmi nízká hlučnost a také vstřícnost k vodním živočichům tzv. rybí přechody, které pomohou eliminovat vzniklou migrační bariéru. Některé malé vodní elektrárny mají dokonce pozitivní vliv na životní prostředí. Vodní elektrárna se podílí na čištění toku zejména proto, že elektrárnou zachycené naplaveniny se nesmí do řeky opětovně vracet.

### 15.1 Emise

Každá elektrárna, která nevyužívá obnovitelné zdroje, produkuje při výrobě elektřiny odpady. V elektrárnách na fosilní paliva se produkuje popel a v jaderných elektrárnách zase jaderný odpad, který je pro lidi nebezpečný a musí se důkladně uskláňovat. Další nevýhodou elektráren na fosilní paliva jsou emisní látky, které se vypouštějí skrze komíny do ovzduší. V dnešní době už mají lidé spoustu metod, jak snižovat emise, avšak stále to není dokonalé. Proto jsem se rozhodl spočítat, jaké množství emisí se nevyprodukuje, když se postaví a bude se využívat mnou navrhnutá malá vodní elektrárna. Tato tabulka ukazuje průměrné množství vyprodukovaných emisí v elektrárnách na fosilní palivo:

Emise	TL	SO <sub>2</sub>	NO <sub>x</sub>	CO	Org. Látky	CO <sub>2</sub>
jednotka	kg/GJ	kg/GJ	kg/GJ	kg/GJ	kg/GJ	kg/GJ
množství	0,02591	0,489376	0,415698	0,0393	0,03086	325

Tabulka 6 - Emise

$$A_{el.r} = A_{el.r} \cdot 3,6 = 152186 \cdot 3,6 = 547870 \text{ MJ} = 548 \text{ GJ} \quad (16.1)$$

$$Org.látky_{u\check{s}} = A_{el.r} \cdot Org.látky = 548 \cdot 0,03086 = 16,91 \text{ kg} \quad (16.2)$$

$$CO_{u\check{s}} = A_{el.r} \cdot CO = 548 \cdot 0,0393 = 21,54 \text{ kg} \quad (16.3)$$

$$CO_{2-uš} = A_{el.r} \cdot CO_2 = 548 \cdot 325 = 178100 \text{ kg} \quad (16.4)$$

$$NO_{x-uš} = A_{el.r} \cdot NO_x = 548 \cdot 0,415698 = 227,8 \text{ kg} \quad (16.5)$$

$$SO_{2-uš} = A_{el.r} \cdot SO_2 = 548 \cdot 0,489376 = 268,18 \text{ kg} \quad (16.6)$$

$$TL_{uš} = A_{el.r} \cdot TL = 548 \cdot 0,02591 = 14,20 \text{ kg} \quad (16.7)$$

Kde  $A_{el.r}$ ...množství vyrobené elektrické energie za rok

TL...tuhé znečišťující látky

SO<sub>2</sub>...oxid siřičitý

NO<sub>x</sub>...oxid dusíku

CO...oxid uhelnatý

CO<sub>2</sub>...oxid uhličitý

emise	TL	SO <sub>2</sub>	NO <sub>x</sub>	CO	Org. Látky	CO <sub>2</sub>
jednotka	kg/GJ	kg/GJ	kg/GJ	kg/GJ	kg/GJ	kg/GJ
množství	14,2	268,18	227,8	21,54	16,91	178100

Tabulka 7 - Ušetřená emise

Můžeme vidět, že i na malou elektrárnu je to docela velké množství CO<sub>2</sub>, které by se mohlo ušetřit a nevypustit do atmosféry.

## 16. ZÁVĚR

Prvním bodem mé práce byla rešerše na téma využití energie malých vodních toků. V úvodu jsem se věnoval vodní energii, krátce historii vodní energie. Přešel jsem k využití vodní energie v České republice. Využíváme pouze 40-50 % z hydroenergetického potenciálu, a to kvůli omezení hydrologických, typografických a ekologických podmínek. V České republice je zhruba 1300 malých vodních elektráren a 4000 lokalit kde by se mohla ještě malá vodní elektrárna nacházet. Dále jsem popsal krátce rozdělení vodních elektráren, a to podle charakteru pracovního režimu a podle získaného spádu. V další části teorie jsem se zabýval hydroenergetickým potenciálem vodního toku, základními parametry hydroenergetického díla. V poslední části mé rešerše jsem se věnoval druhům vodních turbín, a to především turbínám využitelných u malých vodních elektráren abych potom mohl správně určit a vybrat turbínu pro svůj návrh.

V praktické části jsem popisoval a analyzoval hydropotenciál vybrané lokality. Sestavil jsem roční odtokovou křivku, podle které jsem potom vybíral vhodnou turbínu. Rozhodoval jsem se mezi turbínou Kaplanovou a turbínou Bánkiho z důvodů malého průtoku a nízkého spádu a levnější pořizovací ceny jsem se rozhodl pro turbínu Bánkiho, avšak mohla by se použít i turbína Kaplanova, ale realizace by byla dražší a komplikovanější. Ze spádu a průtoku jsem spočítal parametry Bánkiho turbíny pro její výrobu. Bánkiho turbíny se vyrábějí podle požadavků zákazníka. Firma CINK Hydro má na svých stránkách dotazník, kde se vyplní požadované údaje a oni pošlou zpátky cenu a parametry turbíny. Taková turbína by vyšla na 300 000 Kč. Bánkiho turbínu jsem volil dvojkomorovou, abych pokryl větší část odtokové křivky. V závěru mé práce jsem se věnoval energetickému, environmentálnímu a ekonomickému zhodnocení. Nejprve jsem spočítal, kolik se vyrobí elektrické energie za jeden rok fungování. Vycházel jsem z výkupní ceny 2,741 Kč za kWh elektrické energie. Navrhovaná elektrárna vyrobí za rok 152 186 kWh elektrické energie. Náklady na vybudování této malé vodní elektrárny jsem spočetl na 4 729 400 Kč. S těchto údajů jsem mohl vypočítat prostou dobu návratnosti, která se pohybuje mezi 12 až 13 roky. Diskontovaná doba návratnosti je ještě delší a to 17 let. Doba návratnosti je docela dlouhá, a to hlavně kvůli vysokým nákladům na vybudování. Nemohl jsem určit náklady přesně, jelikož má práce se stahuje pouze na návrh výkonových parametrů turbíny. Tyto náklady budou podstatně nižší a to okolo 3 milionů. Potom i doba návratnosti klesne. V úplném závěru jsem vypočítal, kolik nebezpečných látek se nevyprodukuje, když bude v provozu tato malá vodní elektrárna. Celkově se za rok nevyprodukuje 14,2 kg tuhých znečišťujících látek, 268,18 kg oxidu siřičitého, 227,8 kg oxidů dusíku, 21,54 kg oxidu uhelnatého, 16,91 kg organických látek, 178100 kg oxidu uhličitého.

## 17. SEZNAM ZDROJŮ

- [1] Dvoukomorová průtoková turbína | CINK Hydro Energy. [online]. Copyright © 2013 [cit. 10.05.2017]. Dostupné z: <http://cink-hydro-energy.com/cs/dvoukomorova-prutokova-turbina/>
- [2] GABRIEL, Pavel, František ČIHÁK a Petr KALANDRA. Malé vodní elektrárny. Praha: Vydavatelství ČVUT, 1998. ISBN 80-010-1812-1.
- [3] GULLIVER, John S. a Roger E. A. ARNDT. Hydropowerengineering handbook. New York: McGraw-Hill, c1991. ISBN 00-702-5193-2.
- [4] Charakteristika - Elektrárny - Svět energie.cz. Svět Energie - Svět energie.cz [online]. Copyright © 2016, Všechna práva vyhrazena [cit. 10.05.2017]. Dostupné z: <http://www.svetenergie.cz/cz/elektrarny/vodni-elektrarny/charakteristika>
- [5] Informace o vodní energetice | Obnovitelné zdroje | Skupina ČEZ. [online]. Copyright © 2017, ČEZ, [cit. 10.05.2017]. Dostupné z: <https://www.cez.cz/cs/vyroba-elekrtriny/obnovitelne-zdroje/voda/informace-o-vodni-energetice.html>
- [6] KAMINSKÝ, Jaroslav a Mojmír VRTEK. Obnovitelné zdroje energie. Ostrava: VŠB-Technická univerzita, 1998. ISBN 80-707-8445-8.
- [7] SEQUENS, Edvard. Malé vodní elektrárny a životní prostředí. České Budějovice: Calla - Sdružení pro záchranu prostředí, 2009. ISBN 978-80-87267-05-9.
- [8] Třídění a koncepce VE podle velikosti využívaného spádu. In: *Publi* [online]. Ostrava: publi [cit. 2017-05-11]. Dostupné z: <https://publi.cz/books/90/13.html>
- [9] HAVLÍK, Aleš. Využití vodní energie [online]. Praha [cit. 2017-05-11]. Dostupné z: <http://docplayer.cz/15635188-Vyuziti-vodni-energie-doc-ing-ales-havlik-csc.html>. ČVUT.
- [10] Mve.energetika [online]. [cit. 2017-05-11]. Dostupné z: <http://mve.energetika.cz/index.htm>
- [11] Peltonova turbína. In: Wikipedia: the free encyclopedia [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2016 [cit. 2017-05-11]. Dostupné z: [https://cs.wikipedia.org/wiki/Peltonova\\_turbna](https://cs.wikipedia.org/wiki/Peltonova_turbna)
- [12] Vyhláška č. 266/2016 Sb. In: Jihlava: Energetický regulační ústav, 2016, ročník 2016, 266/2016.



- [13] MELICHAR, Jan, Jaroslav BLÁHA a Jan VOJTEK. Malé vodní turbíny: konstrukce a provoz. Praha: České vysoké učení technické, 1998. ISBN 80-010-1808-0.
- [14] VYSOUDIL, Martin. *Návrh malé vodní elektrárny* [online]. Brno, 2009 [cit. 2017-05-11]. Dostupné z: [https://www.vutbr.cz/www\\_base/zav\\_prace\\_soubor\\_verejne.php?file\\_id=18464](https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=18464)
- [15] MRÁZEK, Viktor. *Návrh malé vodní elektrárny* [online]. Ostrava, 2014 [cit. 2017-05-11]. Dostupné z: [https://dspace.vsb.cz/bitstream/handle/10084/105069/MRA0044\\_FS\\_B2341\\_39\\_07R009\\_2014.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://dspace.vsb.cz/bitstream/handle/10084/105069/MRA0044_FS_B2341_39_07R009_2014.pdf?sequence=1&isAllowed=y)
- [16] BĚHAL, Lukáš. *Hodnocení malé vodní elektrárny* [online]. Brno, 2009 [cit. 2017-05-12]. Dostupné z: [https://is.muni.cz/th/173822/pedf\\_b/Hodnoceni\\_vodni\\_elektrarny.pdf](https://is.muni.cz/th/173822/pedf_b/Hodnoceni_vodni_elektrarny.pdf)

## 18. SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1 - Rozdělení vodních elektráren podle využití velikosti spádu [8]	5
Obrázek 2 - Přehradová vodní elektrárna[9]	6
Obrázek 3 - Jezová vodní elektrárna[9]	7
Obrázek 4 - Derivační vodní elektrárna[9]	7
Obrázek 5 - Chronologická čára vodních průtoků	10
Obrázek 6 - Odtoková křivka vodního toku	10
Obrázek 7 - Schéma Francisovy turbíny[10]	15
Obrázek 8-Schéma Kaplanovy turbíny[10]	16
Obrázek 9-Schéma Bánkiho turbíny[10]	17
Obrázek 10-Oběžné lopatky Peltonovy turbíny[11]	18
Obrázek 11-Schéma Peltonovy turbíny[10]	18
Obrázek 12- Roční odtoková křivka pro lokalitu řeky Olše	22
Obrázek 13-Použitelnosti turbín závislá na spádu a průtoku[10]	24
Obrázek 14-Graf součinitele $k_{ld}$ [10]	25
Obrázek 15-Podélný výřez trubky[10]	26
Obrázek 16-Průběh účinnosti průtokové turbíny, složený ze 3 křivek účinnosti při regulaci dělenou regulační klapkou v poměru 1.2 ve srovnání s Francisovou turbínou[1]	29
Obrázek 17-Odtoková křivka s vyznačením pokrytí s regulací	31
Obrázek 18-Vyhláška č.266/2016 Sb.[12]	33
Obrázek 19-Výkupní cena elektrické energie[12]	34

## 20. SEZNAM TABULEK

Tabulka 1 - Tabulka odtokové křivky	21
Tabulka 2 - Vypočtené parametry turbíny	27
Tabulka 3 - Regulace Bánkiho turbíny	31
Tabulka 4 - Doba návratnosti	35
Tabulka 5 - Diskontovaná doba návratnosti	37
Tabulka 6 - Emise	38
Tabulka 7 - Ušetřená emise	39